

LEANDRO BATISTA DE SOUZA

**ESTIMAÇÃO DE ESTADO GENERALIZADA COM  
PROCESSAMENTO DE ERROS DE TOPOLOGIA  
E ERROS EM MEDIDAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Elétrica, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica – PPGEE, Departamento de  
Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia,  
Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elizete Maria Lourenço

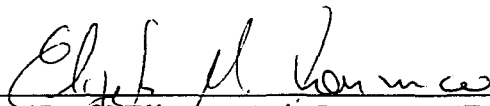
CURITIBA

2007

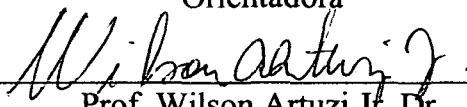
**ESTIMAÇÃO DE ESTADO GENERALIZADA COM PROCESSAMENTO DE  
ERROS DE TOPOLOGIA E ERROS EM MEDIDAS**

**LEANDRO BATISTA DE SOUZA**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



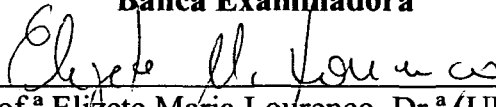
Prof.ª Elizete Maria Lourenço, Dr.ª  
Orientadora



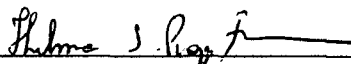
Prof. Wilson Artuzi Jr, Dr.

Coordenador Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

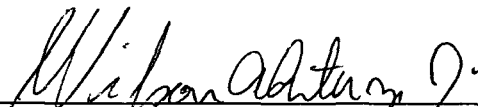
**Banca Examinadora**



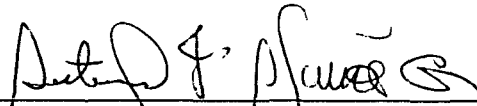
Prof.ª Elizete Maria Lourenço, Dr.ª (UFPR)  
Presidente



Prof.ª Thelma Solange Piazza Fernandes, Dr.ª (UFPR)



Prof. Wilson Artuzi Jr, Dr. (UFPR)



Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Dr. (UFSC)

Curitiba, 08 de novembro de 2007

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão deste trabalho deve-se também ao suporte dado por algumas pessoas, cujos meus agradecimentos especiais são aqui prestados:

À minha professora e orientadora Elizete Maria Lourenço, pelo auxílio, apoio e compreensão, bem como pela especial atenção dispensada no desenvolvimento, acompanhamento, correção e aprimoramento deste estudo;

À Helena e à minha família, pela compreensão nos períodos de ausência;

Ao meu colega Thiago Calvancanti Coelho, pelas diversas contribuições e discussões pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho;

Aos colegas do LACTEC, especialmente aos amigos Lidiane Xavier e Minoru Ikeda, cujo incentivo, companheirismo e suporte tornaram esta caminhada menos árdua;

Aos professores Wilson Artuzi Jr, Thelma Solange Piazza Fernandes e Antonio Simões Costa, pelas sugestões e contribuições feitas em relação a este trabalho.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>1     INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1    REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.1.1   Identificação de Erros de Topologia .....	4
1.1.2   Identificação de Erros Grosseiros em Medidas .....	8
1.1.3   Identificação Conjunta de Erros de Topologia e Erros Grosseiros em Medidas .....	10
1.2    CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO .....	11
1.3    ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	12
<b>2     ESTIMAÇÃO DE ESTADO GENERALIZADA.....</b>	<b>14</b>
2.1    INTRODUÇÃO .....	14
2.2    CONCEITOS .....	14
2.3    OBSERVABILIDADE E CRITICIDADE DE MEDIDAS .....	16
2.3.1   Observabilidade Topológica .....	16
2.3.2   Análise de Criticidade de Medidas e Restrições .....	17
2.4    MODELO DE MEDIÇÃO.....	18
2.5    ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS .....	19
2.6    ESTIMAÇÃO DE ESTADO GENERALIZADA.....	20
2.6.1   Modelagem de Barras de Injeção Nula .....	21
2.7    FORMULAÇÃO COMO UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO RESTRITO .....	23
2.7.1   Modelagem das Medidas Analógicas.....	23
2.7.2   Restrições Operacionais .....	24
2.7.3   Restrições Estruturais.....	24
2.7.4   Formulação da Estimação de Estados Restrita.....	25
2.7.5   Solução pelo Método do <i>Tableau</i> Esparso .....	25
2.7.6   Multiplicadores de Lagrange Normalizados (MLN) .....	27
2.7.7   Inclusão de Informações <i>a priori</i> .....	28
2.8    FLUXO DE POTÊNCIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO .....	29

2.9	ESTIMADOR DE ESTADOS LINEARIZADO .....	29
2.10	CONCLUSÕES .....	32
<b>3</b>	<b>DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS .....</b>	<b>33</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	33
3.2	DETECÇÃO DE ERROS VIA MULTIPLICADORES DE LAGRANGE NORMALIZADOS .....	33
3.3	IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA TESTES GEOMÉTRICOS DE COLINEARIDADE (TESTE DO COSSENO).....	34
3.3.1	Teste do Cosseno para Erro Simples.....	35
3.3.2	Teste do Cosseno para Erros Múltiplos.....	36
3.3.3	Algoritmo de Identificação de Erros de Topologia via Testes Geométricos de Colinearidade.....	40
3.4	IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA REESTIMAÇÃO .....	41
3.5	IDENTIFICAÇÃO DE ERROS EM MEDIDAS ANALÓGICAS .....	42
3.6	CONCLUSÕES .....	43
<b>4</b>	<b>DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO CONJUNTA DE ERROS DE TOPOLOGIA E DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS ANALÓGICAS .....</b>	<b>45</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	45
4.2	NATUREZA DOS ERROS DETECTADOS .....	46
4.2.1	Testes de Colinearidade Aplicados à Determinação da Natureza do Erro .....	47
4.2.1.1	Comprovação da interpretação geométrica aplicada à determinação da natureza do erro .....	48
4.2.2	Comportamento da Natureza dos Erros Detectados.....	50
4.2.3	Metodologia para Determinação da Natureza do Erro .....	52
4.2.4	Considerações Adicionais da Natureza dos Erros Detectados .....	52
4.3	ANÁLISE CONJUNTA DE ERROS DE TOPOLOGIA E EM MEDIDAS ANALÓGICAS .....	53
4.3.1	Análise Conjunta de Erros de Topologia e em Medidas Analógicas: Tratamento Segregado .....	54
4.3.2	Considerações Adicionais da Identificação Conjunta de Erro de Topologia e em Medidas .....	58
4.3.2.1	Identificação de erros em medidas analógicas .....	58
4.3.2.2	Ajuste das condições de teste .....	59
4.3.2.3	Análise de criticidade.....	60
4.3.2.4	Conjunto crítico selecionado como suspeito .....	61
4.4	TESTE DE COLINEARIDADE MODIFICADO (ENCADEADO) .....	62
4.5	CONCLUSÕES .....	65
<b>5</b>	<b>CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>66</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	66
5.2	SISTEMAS TESTE .....	66
5.2.1	Sistema Teste IEEE-30 Barras .....	66
5.2.1.1	IEEE-30 barras - Condição de operação e plano de medição 1 (IEEE30_1) .....	67
5.2.1.2	IEEE-30 barras - Condição de operação e plano de medição 2 (IEEE30_2) .....	67
5.2.2	Sub-rede Relevante do Sistema Teste IEEE 30 barras (19 Barras).....	68
5.2.2.1	Sub-rede relevante do sistema teste IEEE 30 barras - Condição de operação e plano de medição 1 (IEEE19_1) .....	69

5.2.2.2	Sub-rede relevante do sistema teste IEEE 30 barras - Condição de operação e plano de medição 2 (IEEE19_2)	69
5.3	SIMULAÇÃO DE MEDIDAS	71
5.4	SIMULAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA	72
5.4.1	Erro Simples	72
5.4.2	Erro de Inclusão	72
5.4.3	Erro de Exclusão	73
5.4.4	Erro de Seccionamento de Barra ( <i>Bus Split</i> )	73
5.4.5	Correção dos <i>status</i> Identificados como Errôneos	74
5.5	SIMULAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS	74
5.5.1	Erro Simples	74
5.5.2	Erros Múltiplos	74
5.5.3	Falha em Unidade Terminal Remota (UTR)	78
5.5.4	Desativação das Medidas Identificadas como Errôneas	78
5.6	CONCLUSÕES	79
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>80</b>
6.1	NATUREZA DOS ERROS DETECTADOS	80
6.2	RESULTADOS DOS MÉTODOS PROPOSTOS APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA	83
6.2.1	Teste de Colinearidade para IET	83
6.2.2	Comportamento dos métodos de IET diante de Erros em Medidas	86
6.3	RESULTADOS DOS MÉTODOS PROPOSTOS APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS	87
6.3.1	Comportamento dos Métodos de IEM diante de Erros de Topologia	90
6.4	SIMULAÇÃO SIMULTÂNEA DE ERROS	90
6.5	RESULTADOS IMPORTANTES	91
6.6	CONCLUSÕES	93
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS</b>	<b>94</b>
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>100</b>
	APÊNDICE A. DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS ANALÓGICAS DE CADA SISTEMA TESTE	100

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPORTAMENTO DA NATUREZA DOS ERROS DETECTADOS.....	51
TABELA 2 - EXEMPLO TESTE DE COLINEARIDADE MODIFICADO PARA ERROS MÚLTIPLOS EM ... MEDIDAS - SUB-REDE RELEVANTE DO IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS) .....	63
TABELA 3 - EXEMPLO TESTE DE COLINEARIDADE MODIFICADO - INFORMAÇÕES SUSPEITAS .	63
TABELA 4 - CORRELAÇÃO DISJUNTORES - MODELOS COMPLETO E SUB-REDE RELEVANTE .....	71
TABELA 5 - CASOS DE ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS SIMULADOS (SISTEMA..... IEEE19 BARRAS - IEEE 30 BARRAS SUB-REDE RELEVANTE).....	76
TABELA 6 - CASOS DE ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS SIMULADOS (SISTEMA..... IEEE30 BARRAS) .....	77
TABELA 7 - VERIFICAÇÃO DA NATUREZA DO ERRO NA PRESENÇA DE ERROS DE TOPOLOGIA	81
TABELA 8 - VERIFICAÇÃO DA NATUREZA DO ERRO NA PRESENÇA DE ERROS EM MEDIDAS ....	82
TABELA 9 - VERIFICAÇÃO DA NATUREZA DO ERRO NA PRESENÇA DE ERROS DE TOPOLOGIA E. EM MEDIDAS .....	83
TABELA 10 - RESULTADO DO TESTE DE COLINEARIDADE - ERROS DE TOPOLOGIA..... (IEEE19 BARRAS).....	84
TABELA 11 - RESULTADO DO TESTE DE COLINEARIDADE - ERROS DE TOPOLOGIA .....	
(IEEE30 BARRAS).....	86
TABELA 12 - RESULTADO TESTE DE COLINEARIDADE - ERROS SIMPLES EM MEDIDAS .....	
(IEEE-19_1).....	88
TABELA 13 - RESULTADO TESTE DE COLINEARIDADE- ERROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS .....	
(IEEE-19_1).....	89
TABELA 14 - MEDIDAS ANALÓGICAS (SISTEMA 19 BARRAS - SUB-REDE RELEVANTE DO IEEE 30 BARRAS).....	100
TABELA 15 - MEDIDAS ANALÓGICAS (SISTEMA IEEE30_1).....	101
TABELA 16 - MEDIDAS ANALÓGICAS (SISTEMA IEEE30_2).....	102

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO TESTE GEOMÉTRICO DE COLINEARIDADE .....	38
FIGURA 2 - ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO CONJUNTA DE ERROS DE TOPOLOGIA E EM .....	
MEDIDAS .....	57
FIGURA 3 - SISTEMA TESTE IEEE-30 BARRAS E MODELAGEM DAS SUBESTAÇÕES 12 E 15 [7]. ....	66
FIGURA 4 - SUB-REDE RELEVANTE DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS) .....	68
FIGURA 5 - SUB-REDE RELEVANTE DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS) - .....	
CONDIÇÃO 1 [13] .....	69
FIGURA 6 - SUB-REDE RELEVANTE DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS) - .....	
CONDIÇÃO 2 [13] .....	70



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

OTR - Operação em Tempo Real

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ONS - Operador Nacional do Sistema

MLN - Multiplicadores de Lagrange Normalizados

EESP - Estimação de Estados em Sistemas Potência

UTR - Unidade Terminal Remota

IET - Identificação de Erros de Topologia

IEM - Identificação de Erros em Medidas

TI - Transformadores para Instrumentos

## RESUMO

Este trabalho propõe um algoritmo para uso na operação em tempo real de sistemas de potência que seja capaz de identificar erros de topologia e erros grosseiros em medidas tomando por base o conjunto de informações disponíveis do sistema em estudo, possibilitando dessa forma a correta estimação dos estados do sistema. Convencionalmente, o estimador processa a topologia da rede a partir dos estados das chaves para determinar o modelo barra-ramo da rede elétrica e em seguida de posse das medidas analógicas a estimação de estados é realizada, fornecendo como resultado as tensões complexas em todas as barras do sistema. Nesta modelagem apenas as medidas analógicas estão disponíveis, de modo que erros de topologia não podem ser identificados diretamente. Trabalhos recentes permitem a identificação da zona de anomalia onde se localiza o erro, que posteriormente é modelada utilizando-se a formulação generalizada, na qual se modelam e também estão disponíveis as informações referentes a chaves e disjuntores. Os algoritmos de Estimação de Estados atualmente utilizam metodologias dedicadas somente à identificação de erros em medidas ou então somente para a identificação de erros de topologia, não havendo até o momento nenhuma metodologia com o intuito de determinar qual tipo de erro está ocorrendo, devido a grande distância existente atualmente no tratamento de cada um destes tipos de erro. Dessa forma, desenvolveu-se um algoritmo capaz de identificar a natureza do erro detectado, seja de topologia, medida ou de ambos os tipos, com a finalidade de identificá-los e corrigi-los, fornecendo-se, por conseguinte, um método robusto e confiável para identificação de erros. Aplicaram-se os testes geométricos de colinearidade como metodologia principal para identificação de erros de topologia, bem como para a identificação de erros grosseiros em medidas, esta aplicação que até então possui poucos resultados publicados. Testou-se o algoritmo proposto para o sistema de 30 barras do IEEE.

**Palavras-chave:** Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência, Estimação de Estados, Identificação de Informações Errôneas, Identificação de Erros de Topologia, Identificação de Erros de Medidas.

## ABSTRACT

This work proposes an algorithm for power systems real time operation that is able to identify topology errors and gross errors in measurements by using the system's information set available in order to perform a reliable state estimation process. Conventionally the estimator processes the network topology by using the states of the switches and breakers to define the network bus-branch model and estimates the complex voltages for all the system's buses. Topology errors can not be identified directly in this modeling because only the information of the analog measurements is available. Recent works allow the reduced anomaly zone determination and use the generalized formulation of this specific system's area due to the inclusion of switches and breakers' information among the available ones. Actually, the State Estimation algorithms either are used to identify topology errors or are used to identify gross errors in measurements. Until now there are not methodologies dedicated to identify the error source. Thus this work developed an algorithm capable of verify the detected error source (topology, gross measurement, or both), identify all the bad data information and corrects or dismisses them. The collinearity tests were used as the main method for topology error identification, and also to enhance and spread the method usage to identify gross errors in measurements. The algorithm proposed is tested for the IEEE 30 buses system.

**Keywords:** Real Time Power Systems Modeling, Generalized State Estimation, Bad Data Identification, Topology Errors Identification, Gross Errors in Measurements Identification.

# 1 INTRODUÇÃO

A Estimação de Estados [1], [2] em um sistema de potência é uma poderosa ferramenta na determinação de modelos em tempo real para redes interconectadas e seu principal objetivo é tratar o conjunto de medidas proveniente de diferentes pontos do sistema, possibilitando a identificação das medidas portadoras de erros grosseiros e a correção dessas nos centros de supervisão e operação do sistema. Após a correção, o estimador apresenta os valores mais prováveis dessas medidas evitando a tomada de decisões errôneas durante a operação do sistema.

A estimação de estados convencional é realizada utilizando-se a modelagem barra-ramo da rede elétrica [3], sendo este modelo definido previamente através de um configurador de rede. O configurador de redes processa as informações digitais sobre os *status* dos equipamentos de subestações para definir a configuração barra-ramo da rede que será utilizada para a estimação dos estados do sistema.

Na estimação convencional, as informações sobre os *status* de chaves e disjuntores são assumidas corretas, ou seja, não sofrem um processo de tratamento. Como esse conjunto de informações também pode estar contaminado com erros, tem-se a necessidade de avaliar essas informações e definir a correta representação da rede. Essa análise, conhecida como identificação de erros de topologia, tem sido alvo de diversas pesquisas e visa auxiliar o configurador de rede a definir a correta representação do sistema.

Os resultados obtidos a partir da estimação de estados convencional, que considera a modelagem da topologia do sistema como correta, podem levar a resultados com um grau de confiabilidade discutível, uma vez que erros de topologia podem estar presentes.

A modelagem barra-ramo utilizada na estimação convencional não permite a representação explícita de equipamentos de chaveamento, ou seja, os componentes de impedância nula como chaves e disjuntores. Entretanto, a correta modelagem do sistema leva a necessidade de incluir os elementos chaveáveis existentes nas

subestações, para que seja possível estimar o verdadeiro *status* desses dispositivos durante o processo de configuração da rede, dando origem então a estimação de estados generalizada [4]. Além disso, no modelo tradicional do fluxo de carga esses equipamentos não são representados explicitamente, pois, a existência de valores muito baixos de impedância, como no caso de chaves fechadas, ou valores infinitos, como no caso de chaves abertas, resultam em problemas numéricos na resolução das equações básicas do fluxo de carga.

No início da década de 90, Monticelli e Garcia [5], [6], propuseram uma modelagem para chaves e disjuntores que elimina o aparecimento da impedância destes elementos no modelo matemático da rede, contornando os problemas discutidos acima e possibilitando a modelagem da rede no nível de subestação e viabilizando assim a estimação de estados generalizada.

Essa modelagem tem sido utilizada com sucesso na identificação de erros de topologia (IET) em [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Em [13], por exemplo, estimadores de estados generalizados são apresentados, sendo que a rede é modelada no nível de subestação através da representação de chaves e disjuntores, conforme proposto em [5], [6].

Além da identificação de erros de topologia há também a necessidade do tratamento de erros grosseiros em medidas, bastante explorado em [18], [19], [20], [21], [22] e [23].

Atualmente, os esforços para identificação de erros concentram-se principalmente na topologia da rede, cuja influência no processo de estimação de estados é notoriamente mais relevante e significativa.

A identificação de erros de topologia e de erros em medidas simultaneamente, bem como a identificação do comportamento do estimador de estados e a análise do comportamento dos métodos atualmente utilizados diante de ambos os tipos de erros, é um ponto importante que apesar das contribuições de [7], [8], [24] e [25], ainda carece de esforços adicionais, devido às limitações das metodologias e dos resultados apresentados.

Neste sentido, este trabalho propõe um algoritmo para uso na operação em tempo real de sistemas de potência que seja capaz de identificar erros de topologia e erros grosseiros em medidas tomando por base o conjunto de informações disponíveis do sistema em estudo, possibilitando dessa forma a correta estimação dos estados do sistema. Para tanto, avalia-se não só o conjunto de medidas analógicas, mas também o conjunto de informações sobre os *status* de chaves e disjuntores das subestações de interesse, fornecendo-se, por conseguinte, um método robusto e confiável para estimação dos estados do sistema. Assim, desenvolveu-se um algoritmo capaz de identificar a natureza do erro detectado, seja de topologia, medida ou de ambos os tipos, com a finalidade de identificá-los e corrigi-los.

A formulação proposta utiliza a estimação de estados generalizada como um problema de otimização restrito, incluindo as barras de injeção nula na modelagem física de subestações. Os testes geométricos de colinearidade desenvolvidos e apresentados na literatura [16], [17] foram utilizados como metodologia principal na identificação de erros de topologia, bem como para a identificação de erros grosseiros em medidas, aplicação esta até então pouco difundida.

Utilizou-se a abordagem linearizada da rede elétrica [3], para testar o algoritmo, tendo como base o sistema de 30 barras do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho aborda as duas principais fontes de informações errôneas na modelagem de sistemas de potência em tempo real: erros grosseiros em medidas analógicas e erros nas informações digitais, que reportam a topologia da rede [16]. Na sequência apresentam-se, em ordem cronológica, as principais contribuições e métodos desenvolvidos e utilizados nos dois tópicos citados acima.

### 1.1.1 Identificação de Erros de Topologia

Anteriormente à década de 90, os métodos para a identificação de erros de topologia apresentados utilizaram-se de uma das seguintes análises: verificação das medidas de injeção de potência nas barras terminais do ramo erroneamente configurado, comparação dos fluxos que atravessam os disjuntores, estudo dos resíduos de medição e estudo dos resíduos normalizados [11].

Pang e outros propõem em [24] uma metodologia para a solução da aquisição e processamento de problemas em sistemas de potência utilizando técnicas de inteligência artificial para criação e treinamento de uma rede ótima de estimação de estado.

Em [23], Simões Costa e Leão propõem um algoritmo para determinação de um índice de correlação entre os sintomas de anomalia apontados pelo estimador e as medidas relacionadas aos elementos da rede suspeitos de conter erros de modelagem.

Abur e outros [7] propõem uma abordagem na qual os erros nos *status* de disjuntores podem ser detectados e identificados na presença de erros de medidas. O artigo propõe um estimador baseado no Mínimo Valor Absoluto ou *Least Absolute Value* (LAV) em dois estágios. O primeiro estágio usa a modelagem barra-ramo e um estimador LAV para definir as regiões suspeitas de conter erro. No segundo estágio, este resultado é utilizado na definição do grupo de ramos suspeitos passíveis de conterem erros, cujas barras são modeladas no nível de subestação [5], [6]. A topologia correta é determinada a partir da estimação dos fluxos nos disjuntores

modelados.

Em [8], Clements e Simões Costa propõem a utilização dos multiplicadores de Lagrange normalizados (MLN) para a identificação de erros de topologia. Os disjuntores são modelados como ramos chaveáveis, cujos *status* são tratados como restrições operacionais do problema de estimação de estados.

No método proposto por Lourenço e Simões Costa em [9] e [10], os multiplicadores de Lagrange normalizados são utilizados para determinar os disjuntores suspeitos de conterem erro de modelagem. Os testes de hipóteses baseados no teorema de Bayes são utilizados para a IET. Neste método, testa-se a hipótese básica relativa aos *status* dos disjuntores suspeitos de conter erro, e compara-se o valor da probabilidade condicional das hipóteses alternativas referentes a todas as combinações de *status* possíveis dentre os disjuntores suspeitos.

Em sua dissertação de mestrado [11], Vieira propõe a detecção e identificação de erros de topologia através de um estimador de estados ortogonal e testes de hipóteses baseados no teorema de Bayes. A partir da análise dos valores dos resíduos normalizados associados às informações de *status*, obtêm-se os elementos suspeitos de estarem mal configurados. As configurações derivadas da modificação das condições de operação destes elementos determinam as hipóteses alternativas a serem verificadas pelos testes de hipóteses.

Em [12], Colzani propõe a utilização dos índices apresentados em [23] para definir a zona de anomalia, identificando as subestações suspeitas de conterem erros de modelagem. A sub-rede relevante formada pelas subestações suspeitas é então definida com o auxílio do algoritmo de Flament de busca de grafos, que assegura, entre outras propriedades, a ausência de ramos radiais com disjuntores fechados.

Lourenço, em sua tese de doutorado [13], apresenta um método para identificação de erros de topologia considerando a estimação em dois estágios, sendo a estimação restrita [8] utilizada para o segundo estágio. O algoritmo proposto divide-se em três partes: detecção, realizada através dos multiplicadores de Lagrange normalizados associados às restrições operacionais; seleção dos disjuntores suspeitos,



resultante da interpretação geométrica desenvolvida para os multiplicadores de Lagrange (teste do cosseno); e identificação dos erros de topologia, realizada através de testes de hipóteses. A principal vantagem deste método é não necessitar de sucessivas reestimações de estados para cada uma das configurações suspeitas.

Em [26] os autores apresentam uma comparação entre dois modelos de identificação de erros de topologia na estimação de estados. O modelo proposto por Simões Costa, Lourenço e Clements utiliza os MLN e os testes de hipóteses para lidar com os dispositivos desconhecidos ou cujo *status* é desconhecido, bem como inclui informações *a priori* de modo a evitar problemas de criticidade durante a identificação de erros de topologia (permite a representação detalhada de apenas uma parte do sistema). Já no modelo proposto por Pereira, Saraiva e Miranda, os dispositivos chaveáveis são representados pela inclusão de novas variáveis ao vetor de estados.

Em [14], Lourenço, Simões Costa e Clements apresentam um algoritmo capaz de processar erros de topologia em redes modeladas no nível de subestação. A metodologia é baseada no teste de hipóteses, assumindo-se o particionamento dos disjuntores em dois grupos, suspeitos e verdadeiros. A eficiência do método apresentado em [11] é aumentada pela inclusão do teste de colinearidade baseado na interpretação geométrica dos MLN, de modo a garantir que todas as informações cujos *status* estão errados sejam incluídas no conjunto suspeito.

Em [15], Lourenço, Simões Costa e Clements exploram as análises de observabilidade/criticidade aplicáveis as redes representadas no nível físico [13] para melhorar a performance da identificação de erros de topologia. A sensibilidade dos MLN, a análise de criticidade no nível físico e os testes geométricos são aplicados de modo a melhorar o desempenho do teste de hipóteses na identificação dos erros de topologia. No artigo, a análise de criticidade é realizada antes do processo de identificação propriamente dito para melhorar a identificação de erros de topologia, já que não é possível eliminar a criticidade das restrições simplesmente pelo aumento da redundância de medição, pois as mesmas têm maior dependência com a topologia da rede. Nesta abordagem as informações são divididas em três partições: informações

verdadeiras, suspeitas e críticas.

Korres e Katsikas utilizam em [22] uma modelagem probabilística para a identificação dos *status* dos disjuntores, estendendo a estimação de estados pelo método dos mínimos quadrados ponderados (MQP), para incorporar os fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores e seus *status* como variáveis de estado.

No método proposto por Lourenço e Simões Costa em [10], os multiplicadores de Lagrange normalizados são utilizados para determinar os disjuntores suspeitos de conterem erros de modelagem. Os testes de hipóteses fornecem como resultado a probabilidade condicional para as combinações de *status* destes disjuntores, possibilitando ao final a identificação da correta configuração da rede.

Lourenço, Simões Costa e Clements [16] aperfeiçoam a proposta descrita em [8], modelando informações *a priori* sobre os estados na formulação do problema de estimação e executando: a análise de criticidade para evitar problemas de observabilidade, o teste de colinearidade para garantir a seleção de todos os disjuntores erroneamente modelados sejam selecionados como suspeitos e o particionamento das informações em suspeitas e críticas.

Em [17], Lourenço, Simões Costa, Clements e Cernev propõem uma abordagem alternativa de identificação de erros de topologia totalmente baseada no teste de colinearidade entre o vetor dos multiplicadores de Lagrange e as colunas da matriz de covariância correspondente. O método é conceitualmente simples e sua implementação necessita de pouco esforço computacional. Nesta proposta, o teste de colinearidade é executado em 2 etapas: na primeira, o teste visa garantir que todos os disjuntores erroneamente modelados sejam selecionados como suspeitos; na segunda, o teste é aplicado a todos os elementos rotulados como suspeitos até que este conjunto seja reduzido apenas aos dispositivos com *status* errado.

Em [27], Vempati e outros apresentam um estimador de topologia cujas características importantes são: modelagem de subestações no nível de subestação, localização da sub-rede afetada e análise de erros grosseiros em medidas. Este estimador possibilita a determinação da conectividade elétrica da rede com grande

nível de confiança.

### 1.1.2 Identificação de Erros Grosseiros em Medidas

Em [18], Mili apresenta um método de identificação baseado no teste de hipóteses, computando os erros nas medidas estimadas e usando-os como variáveis aleatórias de interesse. Após o teste de detecção revelar a presença de erros em medidas nos resíduos computados, a identificação por teste de hipóteses deriva das seguintes etapas: seleção das medidas suspeitas baseada em seus resíduos normalizados; estimação dos erros nas medidas correspondentes usando um procedimento de estimação linear; decisão quando cada medida é falsa ou verdadeira através do teste de hipóteses aplicado ao seu erro estimado; refinamento, se necessário, do procedimento do teste de hipóteses; e finalmente, correção do estado estimado. Este método resulta em um procedimento único, onde todas as medidas errôneas são identificadas simultaneamente.

Anteriormente a esta proposta, os procedimentos de identificação de erros grosseiros em medidas eram divididos em duas classes: procedimentos por eliminação e procedimentos de critério não-quadrático ou *non-quadratic criteria* (NQC) [18].

Em [19], Mili apresenta um estudo comparativo entre as três classes de identificação de erros em medidas: a identificação por eliminação e pelo critério não-quadrático, usadas largamente até então; e a identificação por teste de hipóteses, descrita pelo próprio autor em [18]. Explora-se o comportamento destes métodos com relação aos seus critérios de seleção, bem como realizam-se diversas simulações e investigações para diversos tipos de erros em medidas (relacionados, não-relacionados e topologicamente não identificáveis). O critério não-quadrático apresentou o pior desempenho, devido a sua grande sensibilidade a baixas redundâncias locais e a interação entre medidas errôneas, possuindo ainda uma lenta convergência e comportamento tendencioso. A identificação por eliminação é atrativa devido a sua implementação ser fácil e simples e mostra-se eficiente para erros não-interativos e em

locais com moderada redundância; entretanto, quando o número de erros e seu espalhamento aumentam, e a redundância diminui, o método torna-se ineficiente. O método de identificação via teste de hipóteses parece combinar eficiência, confiabilidade e compatibilidade com os requisitos de implementação em tempo real. Deste modo, o autor demonstra uma significativa diferença de capacidade entre os métodos diante de cada tipo de erro em medida simulado.

Na sequência, Mili e Van Cutsem [20] apresentaram um procedimento para análise de erros grosseiros na estimação de estados em sistemas de potência, eficiente e confiável para a implementação *on-line*. Este procedimento é baseado na identificação via teste de hipóteses proposta em [18], envolvendo a estimação de erro sequencial e adequadas técnicas de esparsidade. Os autores procuraram com este trabalho a diminuição da distância entre as abordagens teóricas e os procedimentos passíveis de implementação em aplicações em tempo real. Os autores observam que a análise de erros grosseiros pós-estimação, quando da utilização de testes de hipóteses, torna-se menos dispendiosa do que os resultados apresentados até então.

Em [21], Mili e outros, apresentam um novo e robusto algoritmo para identificação de erros em medidas, utilizando um estimador *Least Median Square* (LMS) e um esquema de decomposição do sistema. Apresenta ainda um algoritmo para pré-seleção das medidas do sistema de potência anteriormente à condução da estimação de estado propriamente dita. Como se baseia na decomposição do sistema, permite ser utilizado em determinadas porções do sistema, como por exemplo, as regiões onde os resultados obtidos de outro estimador de estado são questionáveis. Ressalta-se a necessidade de pesquisa de técnicas para a melhoria da identificação de erros grosseiros e o aumento da velocidade computacional do algoritmo.

Korres e Katsikas utilizam em [22] um esquema para análise de observabilidade e para o processamento de erros em medidas analógicas que também permite a adição de pseudo-medidas.

Asada propõe em [28] a análise de erros grosseiros conformativos, reconhecidos por sua dificuldade de detecção, cujas medidas afetadas agem como se

fossem medidas regulares e seus efeitos atingem medidas sem erro grosseiro. A identificação destes tipos de erros foi elaborada através da teoria de decisão, e a partir da consideração da confiabilidade das medidas formula-se como um problema combinatório. O algoritmo de Busca Tabu é proposto para identificação e elaboração de hipóteses.

Em [25], Zhong propõe um método que identifica o modelo de calibração para medidas não-calibradas e estima os parâmetros do modelo de calibração, adicionando-os aos estados do sistema. A natureza permanente dos erros de calibração permite a estimação através de múltiplas verificações (*scans*) das medidas. Os modelos parametrizados das medidas podem ser estimados pela reformulação do problema de estimação de estado convencional e pela incorporação de modelos de calibração. O método proposto identifica um conjunto de medidas suspeitas e coleta consecutivas análises das medidas (processo iterativo para atualização dos parâmetros de calibração). Além disso, o método que é dependente da observabilidade dos parâmetros do modelo de calibração, não é capaz de identificar erros em medidas críticas e sua performance, similarmente a outros métodos para identificação de erros sistemáticos (aqueles introduzidos por transdutores e/ou telemedição), está limitada pela redundância de medição.

### 1.1.3 Identificação Conjunta de Erros de Topologia e Erros Grosseiros em Medidas

Em [7], Abur apresenta um caso em que erros de topologia e de medidas existem simultaneamente e são detectados pelo método dos resíduos normalizados. Assume-se um erro de seccionamento de barra (*bus split*) para a topologia em conjunto com erros em medidas (implementados por um erro grosseiro em uma medida de injeção e pela reversão do fluxo em uma linha adjacente a mesma).

Em [8], Clements e Simões Costa utilizam os resíduos normalizados no processamento de erros grosseiros em medidas, enquanto utilizam-se os multiplicadores de Lagrange normalizados para a identificação de erros de topologia.

Korres e Katsikas executam testes em [22] implementando erros em *status* de disjuntores, bem como implementam erros em medidas e erros de topologia simultaneamente.

Jaén e Gómez-Expósito apresentam em [29], um método alternativo para a estimação de estados com modelagem de subestações, no qual os multiplicadores de Lagrange associados às restrições operacionais podem ser facilmente computados a partir de um modelo implícito, cujo tamanho é ligeiramente maior que a abordagem convencional barra-ramo, que permite o processamento de erros de topologia e de medidas simultaneamente. O modelo implícito por eles proposto está dividido em três etapas: processamento de topologia (identificação de nós elétricos, seleção do grafo de medição, configuração do vetor de estados); estimação de estados (resíduos do vetor dos multiplicadores de Lagrange); análise de erros de medidas e de erros de topologia.

Como se pode ser visto nesta revisão bibliográfica, os problemas envolvendo erros múltiplos de topologia e em medidas ainda representam um desafio, uma vez que os trabalhos abordando este tema são escassos e os resultados e metodologias apresentam restrições. Lacunas estas que motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.2 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Como objetivos principais deste trabalho destacam-se: a investigação da natureza do erro detectado seja ele de origem topológica (digital), em medida analógica ou ambos; a proposta de um processamento e identificação correta de erros de topologia e em medidas que venham a ocorrer, individualmente ou simultaneamente, durante o processo de estimação de estados.

A primeira contribuição deste trabalho advém da análise do comportamento dos MLN e dos testes de colinearidade utilizados em conjunto com a finalidade de fornecer um panorama prévio do processo de identificação de erros, pela determinação do tipo de erro presente na estimação de estados e da escolha do método apropriado ao tratamento de cada um destes tipos de erros. Assim, a partir desta análise,

desenvolveu-se um algoritmo capaz de identificar a natureza do erro detectado, seja de topologia, medida ou de ambos os tipos, com a finalidade de identificá-los e corrigi-los.

Reduziu-se a distância entre os métodos de identificação de erros de topologia (IET) e de identificação de erros grosseiros em medidas (IEM), utilizando-se um mesmo método principal para identificação de ambos, testes geométricos de colinearidade (teste do cosseno).

Na identificação de erros grosseiros em medidas utilizaram-se os testes de colinearidade, proposta esta que apesar de já ter sido prevista em [17] e [30], teve sua primeira utilização e aplicação apresentada neste trabalho.

Apresenta-se, portanto, neste trabalho, um algoritmo único capaz de processar tanto o conjunto de medidas analógicas como o conjunto de informações digitais (*status*), possibilitando uma correta estimação dos estados do sistema. Realiza-se este processo sem a necessidade de uma nova aquisição dos dados do sistema, através de tratamento conjunto de erros grosseiros em medidas e erros de topologia.

Outros resultados importantes, como a verificação do comportamento dos MLN associados às medidas na presença de erros de topologia, bem como do comportamento dos MLN associados às restrições operacionais, compõem os resultados apresentados neste trabalho.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 faz uma revisão da estimação de estado generalizada. Apresentam-se conceitos básicos para o desenvolvimento deste trabalho e imprescindíveis ao entendimento da estimação de estados, como a observabilidade e a análise de criticidade, a modelagem e a formulação para a solução do estimador como um problema de otimização restrito.

No Capítulo 3, os métodos de detecção de erros via MLN e de identificação de erros de topologia e de erros grosseiros em medidas analógicas via testes

geométricos de colinearidade são descritos.

O Capítulo 4 apresenta a contribuição deste trabalho na identificação de erros de topologia e em medidas analógicas. O algoritmo para análise da natureza do tipo do erro detectado, baseado na interpretação dos MLN e dos testes de colinearidade aplicados às medidas e às restrições operacionais é apresentado. Os procedimentos para análise de erros de topologia e de erros em medidas são descritos para cada caso específico, bem como se descreve o algoritmo completo, responsável pela análise do tipo de erro existente, escolha do método para identificação da informação errônea e correção do mesmo.

O Capítulo 5 exhibe os parâmetros e as condições de simulação, as características dos sistemas teste, os planos de medição considerados, as metodologias de simulação de erros de topologia e de erros em medidas, os tipos de erros aos quais os algoritmos foram submetidos para validação e os procedimentos para correção das informações identificados como errôneas.

Os resultados obtidos utilizando-se os algoritmos propostos para as condições de teste apresentadas na identificação de erros de topologia e de erros grosseiros em medidas são reportados no Capítulo 6.

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões finais do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.



## 2 ESTIMAÇÃO DE ESTADO GENERALIZADA

### 2.1 INTRODUÇÃO

A Estimação de Estados em Sistemas Potência (EESP) é amplamente reconhecida como uma ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência, principalmente devido a sua habilidade de detectar e identificar informações errôneas entre as medidas analógicas processadas. Entretanto, erros também podem ocorrer em medidas digitais responsáveis por reportar os *status* de disjuntores e chaves [17].

Atualmente, na operação de sistemas de potência, a eficiência dos aplicativos usados para propósitos comerciais ou de segurança são altamente dependentes da qualidade das informações utilizadas. O papel da EESP é prover uma base de dados confiável em tempo real [24].

O problema geral da EESP pode ser dividido da seguinte forma [24]: identificação da topologia da rede; análise de observabilidade, que verifica se o conjunto de medidas disponíveis permite a estimação de todas as tensões complexas do sistema; estimação dos estados do sistema a partir da estrutura e parâmetros da rede e do grupo de medidas pré-filtradas; detecção e identificação de erros grosseiros em medidas.

A seguir são descritos alguns conceitos e definições imprescindíveis à compreensão e aplicação da EESP.

### 2.2 CONCEITOS

#### TELEMEDIDAS [11]

São todas as informações sobre o sistema obtidas em tempo real, através de transdutores, sendo elas: as digitais, relativas aos *status* de chaves e disjuntores; e as analógicas, relativas às grandezas elétricas (fluxo e injeção de potência, tensão

elétrica).

## PSEUDO-MEDIDAS

São todas as informações derivadas ou obtidas em função de outros valores medidos, como por exemplo, o fluxo de potência numa linha de transmissão, obtido a partir dos parâmetros da rede (impedância da linha) e das medidas de magnitude e ângulo das tensões nas respectivas barras terminais. Consideram-se também como pseudo-medidas, as medições obtidas de execuções prévias do estimador de estados.

## ESTADOS [11]

São as variáveis que possibilitam o conhecimento dos valores de todas as demais grandezas físicas de interesse para a operação do sistema. Em sistemas de potência, as tensões complexas nas barras são usualmente definidas como variáveis de estado.

## ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

Processo que consiste no cálculo de estimativas para os estados a partir do conhecimento da estrutura, parâmetros e telemidas do sistema.

## INFORMAÇÕES *A PRIORI*

São as informações prévias sobre os valores das variáveis de estado do sistema de potência. Considerando-se que não há ocorrência de eventos relevantes à todo instante na operação do sistema, pode-se atribuir, por exemplo, informações *a priori* de que os estados atuais são iguais aos obtidos na estimação anterior.

## PLANO DE MEDIÇÃO

É o conjunto de medidas (telemidas e pseudo-medidas) a serem processadas pelo estimador de estados. Um conjunto de medidas redundante e bem distribuído ao longo do sistema proporcionará um bom plano de medição e conseqüentemente uma base de dados confiável, resultando numa boa capacidade no processamento de erros.

## 2.3 OBSERVABILIDADE E CRITICIDADE DE MEDIDAS

A observabilidade da rede e a análise de criticidade das medidas são ferramentas importantes para a modelagem de sistemas de potência em tempo real. É um subproblema que consiste em verificar se o número e a localização das medidas a serem processadas pelo estimador permitem a determinação dos estados do sistema. Um sistema é observável em relação a um determinado plano de medição quando é possível estimar-se todas as suas variáveis de estado a partir do processamento das medidas contidas neste plano de medição.

Uma condição necessária para a solução da EESP é que a matriz Jacobiana do modelo de medição possua posto das colunas completo [5]. Um sistema de potência cujo grupo de medidas satisfaz esta condição é dito algebricamente observável, exceto apenas na ocorrência de problemas numéricos que afetem a convergência do processo iterativo [13].

### 2.3.1 Observabilidade Topológica

Os fundamentos da análise de observabilidade topológica utilizam conceitos básicos da teoria de grafos.

Em [13], apresenta-se um algoritmo essencialmente topológico para a análise da observabilidade topológica generalizada, permitindo o processamento de ramos chaveáveis e a realização simultânea das análises de observabilidade e criticidade.

“Algoritmos puramente topológicos, caracterizados pelo fato de não utilizarem cálculos em ponto flutuante, fornecem resultados que, em caso de não-observabilidade do sistema, podem ser utilizados tanto para a definição de ilhas observáveis quanto para a alocação de pseudo-medidas que propiciem a recuperação artificial da observabilidade do sistema” [13].

### 2.3.2 Análise de Criticidade de Medidas e Restrições

Uma medida ou restrição é considerada crítica quando sua ausência ou exclusão do plano de medição torna o sistema não observável [11]. Isto significa que a perda de uma informação crítica reduz o posto da matriz Jacobiana ( $H$ ) de uma unidade, ou seja, esta medida contém a única informação sobre uma determinada variável de estado que, conseqüentemente, não pode ser estimada quando da eliminação da referida medida ou restrição [13].

Define-se como conjunto crítico, um conjunto de medidas cuja ausência ou remoção, do plano de medição, de qualquer um de seus elementos, torna crítica todas as medidas remanescentes neste conjunto crítico [13].

A análise de criticidade [31] revela os pontos fracos da configuração de medição empregada, ou seja, aponta as informações críticas, cuja ausência acarreta em um sistema não observável. Além disso, esta análise apresenta todas as informações pertencentes a cada um dos conjuntos encontrados.

Alguns resultados e características pertinentes são apresentados em [13]:

- a) O resíduo de estimação normalizado associado a uma informação crítica é nulo;
- b) Os resíduos normalizados ou os MLN associados às informações pertencentes a um determinado conjunto crítico têm o mesmo valor absoluto;
- c) Informações críticas contaminadas por erros grosseiros não podem ser detectadas;
- d) Um erro grosseiro em uma informação pertencente a um conjunto crítico não pode ser corretamente identificado, pois o erro identificado pode estar presente em qualquer um dos elementos do conjunto crítico ao qual pertence à informação identificada como errônea;
- e) É essencial dispor-se de uma ferramenta para determinação de medidas e conjuntos críticos, uma vez que a presença de algum destes

é suficiente para comprometer a eficiência do processamento de erros na estimação de estados.

## 2.4 MODELO DE MEDIÇÃO

Considere um sistema de potência com  $N_b$  barras, sendo  $N_m$  o número de medidas efetuadas e supondo-se que a topologia e os parâmetros da rede elétrica são conhecidos. Nestas condições é possível determinar os fluxos de potência em qualquer linha de transmissão e/ou injeção de potência em qualquer barra a partir da tensão complexa (magnitude e ângulo) em cada barra do sistema. Por este motivo, as tensões complexas nas  $N_b$  barras são chamadas variáveis de estado. Dessa forma, o vetor de estados  $\hat{x}$ , é formado por  $N_b$  variáveis correspondentes aos módulos das tensões nas barras e  $N_m - 1$  variáveis correspondentes aos ângulos nas barras do sistema (o ângulo da barra de referência é conhecido). Portanto, a dimensão do vetor de estados do sistema é dada por  $n = 2N_b - 1$ .

O conjunto de medidas da rede, as variáveis de estado do sistema e os erros de medição podem ser relacionados através do seguinte modelo de medição [13]:

$$z_m = z_0 + \varepsilon_m \quad (2.1)$$

onde:

$z_m$  : vetor das quantidades medidas ( $N_m \times 1$ );

$z_0$  : vetor com os valores verdadeiros das quantidades medidas ( $N_m \times 1$ );

$\varepsilon_m$  : vetor dos erros aleatórios de medição ( $N_m \times 1$ ).

O vetor de erros,  $\varepsilon_m$ , representa as imprecisões dos medidores, erros nos transformadores para instrumentos (TI), erros de comunicação, efeitos da conversão analógica digital, etc. Supondo que este vetor possui média zero e que os erros de medição são não correlacionados, a matriz de covariância correspondente é diagonal e seus elementos são definidos pelas variâncias dos erros de medição, calculados com base na precisão dos instrumentos de medição.

Assim:

$$E\{\varepsilon_m\} = 0 \quad E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} = R_m \quad (2.2)$$

onde:

$E\{.\}$ : valor esperado ou média;

$R_m$ : representa a matriz diagonal de covariância ( $N_m \times N_m$ ), tal que os valores dos elementos diagonais correspondem às variâncias dos erros de medição dado por  $R_{ii} = \sigma_i^2$ .

Com base nas leis de Kirchhoff e na lei de Ohm, o vetor de medidas  $z_0$  pode ser expresso com uma função não linear que relaciona as quantidades medidas às variáveis de estados (magnitude e ângulo das tensões nas barras), isto é [32]:

$$z_0 = h_m(\hat{x}) \quad (2.3)$$

onde:

$h_m(x)$ : vetor das funções não lineares que correlacionam as quantidades medidas aos estados ( $N_m \times 1$ );

$\hat{x}$ : vetor dos estados verdadeiros ( $n \times 1$ ).

## 2.5 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Neste método, considerado o método clássico da estimação de estados, o vetor de estados estimados  $\hat{x}$  é determinado de forma a minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos. O problema consiste em determinar as estimativas para o vetor de estados que melhor se ajustem ao modelo de medição. Os resíduos de estimação são definidos como:

$$r_m = z_m - h_m(x). \quad (2.4)$$

Modelando-se estes resíduos como um problema de mínimos quadrados ponderados, uma estimativa para os valores dos estados pode ser obtida minimizando-se a função objetivo representada pela equação:

$$J(\hat{x}) = [z_m - h_m(\hat{x})]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})]. \quad (2.5)$$

Sabendo-se que o vetor  $h_m(x)$  é composto por um conjunto de funções não-lineares, pode-se obter sua solução iterativamente, como uma seqüência de problemas lineares. A função custo a ser minimizada para o problema linearizado é expressa por [13], [33]:

$$J(\Delta\hat{x}) = [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta\hat{x}^k]^T R_m^{-1} [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta\hat{x}^k] \quad (2.6)$$

onde:

$\Delta z = z_m - h_m(\hat{x}^k)$ : vetor de resíduos de medição;

$\Delta x = (x - \hat{x}^k)$ : vetor de resíduos dos estados;

$H(\hat{x}^k) = \frac{\partial h_m(\hat{x}^k)}{\partial \hat{x}^k}$ : matriz Jacobiana das funções não-lineares que relaciona as medidas às variáveis de estado.

A condição necessária de otimalidade é dada por:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \Rightarrow [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta\hat{x}^k]^T R_m^{-1} [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta\hat{x}^k] = 0. \quad (2.7)$$

A condição de otimalidade, leva à Equação Normal de Gauss [8], [35]:

$$G\Delta\hat{x}^k = H^T R_m^{-1} \Delta z \quad (2.8)$$

onde  $G$  é a matriz ( $n \times n$ ) dada por:

$$G = H^T R_m^{-1} H. \quad (2.9)$$

A matriz  $G$ , denominada matriz ganho ou de informação, é simétrica em estrutura e é definida positiva se, e somente se, o número e a distribuição de medidas do plano de medição sejam tais que assegurem a observabilidade da rede elétrica. Satisfeitas estas condições a equação (2.8) apresenta uma solução única.

## 2.6 ESTIMAÇÃO DE ESTADO GENERALIZADA

A estimação de estados convencional pode ser aplicada no nível barra-ramo e supõe que todos os dados referentes aos *status* de chaves e disjuntores processados pelo configurador de redes estão corretos. Entretanto, para que a identificação de erros de topologia tenha maior confiabilidade devem-se modelar as áreas suspeitas do sistema elétrico no nível de seção de barras. Com esta generalização da estimação de

estados, é possível a modelagem no nível de subestação, onde as chaves e disjuntores são explicitamente representados. Apesar de haver um acréscimo de variáveis de estado devido à inclusão dos fluxos nos ramos chaveáveis, este nível de detalhamento permite a inclusão de novas informações provenientes desta representação, tais como: medidas de fluxo em chaves e disjuntores, e injeção de potência nula em seções de barra.

Um modo de evitar problemas numéricos decorrentes da representação da impedância de chaves e disjuntores é a utilização de ramos de impedância nula proposta por Monticelli [5], [6]. Esta proposta elimina o aparecimento da impedância destes elementos no modelo matemático da rede, evitando assim problemas de condicionamento numérico e possibilitando a modelagem da rede no nível de subestação.

Alguns trabalhos, [7] e [13], propõe a realização da estimação de estados em dois estágios: no primeiro estágio a rede é modelada no nível barra-ramo e os resultados são usados para a determinação da zona de anomalia suspeita de conter erro na modelagem; no segundo estágio as barras suspeitas de anomalia são modeladas no nível de subestação. Este procedimento visa evitar o elevado e desnecessário custo computacional decorrente do aumento no número de variáveis a serem estimadas caso toda a rede seja modelada no nível de subestação.

### 2.6.1 Modelagem de Barras de Injeção Nula

Diferentemente dos demais ramos da rede, a impedância das chaves e disjuntores é zero quando fechados ou infinita quando abertos. Uma das alternativas para se representar esta situação no modelo de estimação de estados, consiste em, representar estes ramos por uma impedância suficientemente pequena quando fechados ou suficientemente grande quando abertos sem afetar a precisão dos resultados. Entretanto, este tipo de modelagem tende a acarretar problemas de condicionamento numérico na estimação de estados.



A alternativa apresentada por Monticelli [5], [6], consiste em adotar a modelagem de ramos de impedância nula que não empregam os valores relativos às impedâncias destes dispositivos no modelo matemático da rede. Esta modelagem requer algumas modificações na formulação convencional da estimação de estados. Consideram-se os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis como variáveis de estado. Dessa forma, supondo a modelagem de um ramo chaveável entre os nós  $i$  e  $j$ , os fluxos de potência ativa  $t_{kl}$  e reativa  $u_{kl}$  através deste ramo devem ser incluídos no vetor de variáveis de estado. O vetor de estados  $x$  que antes era composto somente pelas magnitudes e ângulos de tensão nas barras é então ampliado incluindo também os fluxos nos ramos chaveáveis.

O problema de estimação de estados também deve incluir informações referentes aos *status* de chaves e disjuntores. Quando o ramo chaveável estiver aberto, os fluxos de potência ativa e reativa no ramo serão nulos. Por outro lado, se este ramo estiver fechado a diferença angular e a queda de tensão entre seus terminais serão nulas.

Além disso, a inclusão das chaves e disjuntores como variáveis de estados implica que eventuais medidas de fluxo de potência em chaves e disjuntores sejam expressas em termos das novas variáveis de estados, ou seja, através dos fluxos medidos nos ramos chaveáveis e não mais em função das variáveis de estados convencionais. Assim, para um disjuntor ligado entre os nós  $k$  e  $l$  cujos fluxos ativo e reativo sejam monitorados, estas medidas serão expressas por:

$$z_{t_{ij}} = t_{ij} + \varepsilon_{t_{ij}} \quad (2.10)$$

$$z_{u_{ij}} = u_{ij} + \varepsilon_{u_{ij}} \quad (2.11)$$

onde:

$\varepsilon_{t_{ij}}$  e  $\varepsilon_{u_{ij}}$ : erros aleatórios das medidas de fluxo de potência ativa e reativa do disjuntor  $i - j$ , respectivamente.

Dessa forma, as medidas de injeção de potência incidentes aos nós  $i$  e  $j$ , podem ser obtidas pela somatória dos fluxos nos ramos adjacentes. Para os ramos chaveáveis, os fluxos são expressos em termos de suas variáveis de estados,  $t_{ij}$  e  $u_{ij}$ .

Para os demais ramos da rede, os fluxos são calculados da maneira usual, em função das variáveis de estados nodais. Assim, se as injeções de potência ativa e reativa da barra  $i$  são medidas, então as medidas de injeções de potência ativa  $z_{pi}$  e reativa  $z_{qi}$ , podem ser expressas como:

$$z_{pi} = \sum_{k \in \Omega_i} t_{ik}(\theta_i, \theta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \Gamma_i} t_{il} + \varepsilon_{pi} \quad (2.12)$$

$$z_{qi} = \sum_{k \in \Omega_i} u_{ik}(\theta_i, \theta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \Gamma_i} u_{il} + \varepsilon_{qi} \quad (2.13)$$

onde:

$t_{ik}$  : fluxo de potência ativa no ramo  $i - k$  ;

$u_{ik}$  : fluxo de potência reativa no ramo  $i - k$  ;

$\Omega_i$  : conjunto de ramos convencionais incidentes à barra  $i$  ;

$\Gamma_i$  : conjunto de ramos chaveáveis incidentes à barra  $i$  ;

$\varepsilon_{pi}$  : erro aleatório das medidas de potência ativa;

$\varepsilon_{qi}$  : erro aleatório das medidas de potência reativa.

## 2.7 FORMULAÇÃO COMO UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO RESTRITO

Em [8], Clements e Simões Costa propuseram a resolução da estimação de estados generalizada como um problema de otimização restrito. Para tanto, as informações provenientes da representação de ramos de impedância nula e das equações de medidas analógicas são incluídas no problema de minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos sob a forma de restrições de igualdade, conforme descrito a seguir.

### 2.7.1 Modelagem das Medidas Analógicas

As medidas analógicas provenientes da telemedicação devem estar presentes na modelagem em tempo real. A modelagem destas medidas está representada na seção 2.4.

### 2.7.2 Restrições Operacionais

A representação de chaves e disjuntores, conforme descrito na seção 2.6.1, deve considerar o *status* atual destes dispositivos, e portanto, para cada *status* deve-se utilizar diferentes restrições.

As restrições necessárias à representação de um disjuntor fechado, que conecta os nós  $i$  e  $j$ , são as seguintes:

$$\theta_i - \theta_j = 0 \quad (2.14)$$

$$V_i - V_j = 0. \quad (2.15)$$

Para um disjuntor aberto entre os nós  $i$  e  $j$ , este dispositivo será representado pelas seguintes restrições:

$$t_{ij} = 0 \quad (2.16)$$

$$u_{ij} = 0. \quad (2.17)$$

Uma vez que um disjuntor pode ter seu *status* modificado de acordo com as necessidades da operação do sistema, estas restrições são chamadas de *restrições operacionais*.

As restrições operacionais são referenciadas genericamente na formulação da estimação de estados restrita por:

$$h_o(x) = 0. \quad (2.18)$$

### 2.7.3 Restrições Estruturais

De acordo com a configuração física da rede podem surgir novas restrições denominadas *restrições estruturais*. Estas restrições representam as barras e/ou nós de passagem cujas injeções de potência ativa e reativa são nulas, muito mais freqüentes na modelagem no nível de subestação, representadas no estimador do seguinte modo:

$$p_i = 0 \quad (2.19)$$

$$q_i = 0 \quad (2.20)$$

onde  $p_i$  e  $q_i$  representam as injeções de potência ativa e reativa na barra  $i$ , respectivamente.

Outra restrição estrutural é a definição de barras de referência angular em ilhas ou barras isoladas do sistema, cuja representação da restrição no problema de estimação é do tipo  $\theta_r = 0$ .

As restrições das barras de injeção nula e as restrições das barras de referências são genericamente referenciadas por:

$$h_s(x) = 0. \quad (2.21)$$

#### 2.7.4 Formulação da Estimação de Estados Restrita

Considerando a inclusão das restrições operacionais e estruturais, o problema que minimiza a soma ponderada dos quadrados dos resíduos torna-se um problema de otimização restrito, descrito em [8] como:

$$\text{Minimizar} \quad \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \quad (2.22)$$

$$\text{sujeito a:} \quad r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (2.23)$$

$$h_o(\hat{x}) = 0 \quad (2.24)$$

$$h_s(\hat{x}) = 0 \quad (2.25)$$

onde :

$r_m$  : vetor de resíduos das quantidades medidas ( $N_m \times 1$ );

$R_m$  : matriz de covariância dos erros de medição, suposta diagonal ( $N_m \times N_m$ );

$\hat{x}$  : vetor de estimativas dos estados ( $n \times 1$ ).

#### 2.7.5 Solução pelo Método do *Tableau* Esparso

Atribuindo-se multiplicadores de Lagrange para as restrições, a função Lagrangeana para a resolução do problema de estimação de estados restrita é expressa por:

$$L = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \lambda_m^T (z_m - h_m(\hat{x}) - r_m) + \lambda_s^T (-h_s(\hat{x})) + \lambda_o^T (-h_o(\hat{x})) \quad (2.26)$$

Aplicando as condições de otimalidade de 1ª ordem, também conhecidas por

condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), têm-se:

$$\frac{\partial L}{\partial r} = R_m^{-1} r_m - \lambda_m = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -H_m^T(\hat{x})\lambda_m - H_s^T(\hat{x})\lambda_s - H_o^T(\hat{x})\lambda_o = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_m} = z_m - h_m(\hat{x}) - r_m = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_s} = -h_s(\hat{x}) = 0 \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_o} = -h_o(\hat{x}) = 0 \quad (2.31)$$

onde:

$$H_m(\hat{x}) = \frac{\partial h_m(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.32)$$

$$H_s(\hat{x}) = \frac{\partial h_s(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.33)$$

$$H_o(\hat{x}) = \frac{\partial h_o(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.34)$$

com dimensões  $N_m \times n$ ,  $N_s \times n$  e  $N_o \times n$ , e sendo  $N_m$ ,  $N_s$  e  $N_o$  os números de medidas, restrições estruturais e operacionais respectivamente.

Através da equação (2.27), pode-se expressar  $r_m$  em termos de  $\lambda_m$  como:

$$r_m = R_m \lambda_m \quad (2.35)$$

Linearizando-se o problema em relação a um dado vetor de estados  $\hat{x}^k$ , eliminando-se a variável  $r_m$  e utilizando-se a equação acima, as equações de otimalidade serão então descritas por:

$$z_m - h_m(\hat{x}^k) - H_m(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} - R_m \lambda_m = 0 \quad (2.36)$$

$$h_s(\hat{x}^k) + H_s(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} = 0 \quad (2.37)$$

$$h_o(\hat{x}^k) + H_o(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} = 0 \quad (2.38)$$

$$H_m^T(\hat{x}^k)\lambda_m - H_s^T(\hat{x}^k)\lambda_s - H_o^T(\hat{x}^k)\lambda_o = 0 \quad (2.39)$$

Na forma matricial o conjunto de equações lineares acima representados é expresso por:

$$\begin{bmatrix} 0 & H^T \\ H & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

onde:

$$H \triangleq \begin{bmatrix} H_m(\hat{x}^k) \\ H_s(\hat{x}^k) \\ H_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} \quad e \quad r^{(k)} = \begin{bmatrix} z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ -h_s(\hat{x}^k) \\ -h_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Os valores dos multiplicadores de Lagrange  $\lambda_o$  e  $\lambda_s$ , representam a sensibilidade da função objetivo do problema com relação às suas respectivas restrições.

### 2.7.6 Multiplicadores de Lagrange Normalizados (MLN)

O multiplicador de Lagrange normalizado,  $\lambda_i^N$ , é definido como [8]:

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{V_{ii}}} \quad (2.43)$$

onde  $V$  é a matriz de covariância do vetor  $\lambda$ .

A matriz de covariância  $V$  pode ser obtida a partir da relação:

$$\begin{pmatrix} -\Sigma & C^T \\ C & V \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} 0 & H^T \\ H & R \end{pmatrix}^{-1}. \quad (2.44)$$

Os multiplicadores de Lagrange representam a sensibilidade da função objetivo em relação à variação nos resíduos de medição e nas equações das restrições da estimação de estados como um problema de otimização restrito.

Na ausência de erros grosseiros em medidas, considerando-se a modelagem correta da rede por meio de restrições (operacionais e estruturais) e na hipótese de que

os erros aleatórios nas medidas têm média zero, pode-se demonstrar que os multiplicadores de Lagrange são variáveis aleatórias com média zero, cuja matriz de covariância é  $V$  [8]. Portanto o multiplicador de Lagrange normalizado é uma variável aleatória de média zero e variância unitária.

Os multiplicadores de Lagrange normalizados também vêm sendo utilizados para a detecção e identificação de erros grosseiros [8] e detecção [8], [13], [11] e identificação de erros de topologia [8].

Em [16] e [17], utiliza-se um método baseado na correlação entre os multiplicadores de Lagrange ( $\lambda$ ) e sua respectiva matriz de covariância ( $V$ ) para análise de erros. Em [8], mostra-se que na análise de erro linearizada a relação entre  $\lambda$  e o vetor  $\varepsilon$  de erros em medidas e restrições estruturais/operacionais é dada por:

$$\lambda = V\varepsilon . \quad (2.45)$$

### 2.7.7 Inclusão de Informações *a priori*

Informações prévias sobre as variáveis de estados podem ser facilmente inseridas na formulação do problema de estimação de estados restrita. Supondo que  $\bar{x}$  é o vetor  $nx1$  de informações *a priori* sobre as variáveis de estado e que  $P$  é a matriz  $nxn$  de covariância dos erros dos estados *a priori*, a nova função objetivo do problema de EESP considerando informações *a priori* é dada por:

$$J(\hat{x}) = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \quad (2.46)$$

Realizando-se as modificações pertinentes tem-se na forma matricial o seguinte conjunto de equações [10]:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m(\hat{x}^k) & H_s(\hat{x}^k) & H_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{x} \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}(\hat{x} - \bar{x}^k) \\ z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ -h_s(\hat{x}^k) \\ -h_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

A inclusão de informações *a priori* melhora o condicionamento do método do *Tableau* Esperso, pois tem a propriedade de proporcionar uma maior dominância da

diagonal principal [11].

## 2.8 FLUXO DE POTÊNCIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Em [34], Ribeiro Pinto apresenta em sua dissertação de mestrado, um algoritmo para a solução do fluxo de potência incorporando a representação dos ramos de impedância nula.

O fluxo de potência no nível de subestação constitui a extensão da formulação convencional de fluxo de carga de forma a possibilitar o processamento de sistemas modelados no nível de seção de barras e ao mesmo tempo evitar problemas numéricos decorrentes da representação de chaves e disjuntores, baseado na modelagem de ramos de impedância nula, proposta para a estimação de estados [34], [35].

Os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis são considerados como novas variáveis de estado, em adição as variáveis de estado da formulação convencional (tensões complexas nas barras). Dessa forma, evita-se a utilização da impedância dos ramos chaveáveis, contornando-se assim problemas numéricos.

A utilização da modelagem barra-ramo não permite representar os arranjos das subestações no modelo da rede, perdendo-se assim todas as informações contidas dentro destas. Na representação proposta em [34], os fluxos de potência nos equipamentos de subestações podem ser diretamente verificados nos resultados do fluxo de carga, evitando-se as dificuldades que operadores e analistas de sistemas encontram com os algoritmos atuais.

## 2.9 ESTIMADOR DE ESTADOS LINEARIZADO

No caso linearizado, o estimador de estados processa somente as medidas de potência ativa (injeções de potência ativa nas barras e fluxos de potência ativa nas linhas de transmissão) buscando estimar os valores para os ângulos de todas as barras em função dos quais se podem calcular todas as variáveis de interesse do sistema [32].

O estimador de estados linearizado utiliza as mesmas aproximações do fluxo



de potência linearizado [3]:

- a) As magnitudes das tensões em todas as barras do sistema de potência possuem valor igual a 1 p.u.;
- b) As resistências e admitâncias das linhas de transmissão são supostas desprezíveis;
- c) Os ângulos das tensões nas barras são supostos pequenos o suficiente para justificar a aproximação:  $\text{sen}(\theta_i - \theta_j) \approx \theta_{ij}$  radianos.

Considerando-se as hipóteses acima, têm-se:

$$\text{Ramo convencional:} \quad z_{t_{ij}} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \quad (2.48)$$

$$\text{Ramo chaveável:} \quad z_{t_{ij}} = t_{ij} + \varepsilon_{t_{ij}} \quad (2.49)$$

$$z_{p_i} = \sum_{k \in \Omega_i} t_{ik}(\theta_i, \theta_k) + \sum_{l \in \Gamma_i} t_{il} + \varepsilon_{p_i} \quad (2.50)$$

onde:

$\theta_i, \theta_j$ : ângulo da tensão nas barras  $i$  e  $j$ , respectivamente;

$z_{t_{ij}}$ : fluxo de potência ativa entre as barras  $i$  e  $j$ ;

$z_{p_i}$ : injeção de potência ativa na barra  $i$ ;

$\varepsilon$ : erro aleatório nos valores medidos;

$\Omega_i$ : conjunto de ramos convencionais incidentes à barra  $i$ ;

$\Gamma_i$ : conjunto de ramos chaveáveis incidentes à barra  $i$ .

Como as magnitudes das tensões nas barras são constantes e iguais a 1 p.u., as variáveis a estimar são os ângulos das tensões nas barras e as medidas de fluxo de potência em chaves e disjuntores. O vetor de estados  $\hat{x}$  é formado por valores correspondentes aos ângulos das tensões (o ângulo da barra de referência é conhecido), cuja dimensão é  $n = N_B - 1$ , acrescido das medidas  $t_{ij}$  nos disjuntores considerados no plano de medição. Da mesma forma, o vetor de medidas  $z$  envolve apenas medidas de fluxo (ramos convencionais e chaveáveis) e injeções de potência ativa. Assim:

$$\hat{x} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N_B}, t_{disj1}, t_{disj2}, \dots, t_{disj(n_D)}]^T \quad (2.51)$$

$$\text{Vetor de estados:} \quad z = [z_t^T : z_{t_{disj}}^T : z_p^T]^T \quad (2.52)$$

onde:

$\hat{x}$  : vetor de estados do sistema;

$N_b$  : número de barras do sistema;

$n_D$  : número de disjuntores do sistema;

$t_{disj}$  : fluxo de potência ativa nos disjuntores;

$z_t$  : vetor de medidas de fluxo de potência ativa nos ramos convencionais;

$z_{t_{disj}}$  : vetor de medidas de fluxo de potência ativa nos ramos chaveáveis;

$z_p$  : vetor de medidas de injeção de potência ativa.

O modelo de medição para o estimador de estados linearizado é dado por:

$$z = H_m \theta + \varepsilon_m \quad (2.53)$$

$$E\{\varepsilon_m\} = 0; \quad E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} = R_m = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (2.54)$$

onde:

$\sigma_m^2$  : variância da medida  $m$ ;

$H_m$  : matriz de observação do modelo de medição, que depende dos parâmetros das linhas ( $N_m \times n$ );

$\varepsilon_m$  : vetor aleatório que simula os erros de medição ( $N_m \times 1$ );

$R_m$  : matriz de covariância dos erros de medição ( $N_m \times N_m$ ).

Observa-se que a relação existente entre as quantidades medidas e os estados é linear. Como consequência, a matriz de observação  $H$  do modelo de medição é constante e seus elementos são combinações lineares das capacidades das linhas.

As características do modelo linearizado permitem realizar o cálculo do vetor de estados de uma forma não-iterativa. Usando-se o método da matriz aumentada ou *Tableau* Esperso (seção 2.7.5), o sistema de equações a ser resolvido torna-se:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m & H_s & H_o \\ H_m & R_m & 0 & 0 \\ H_s & 0 & 0 & 0 \\ H_o & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}^k \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

onde:

$H_m, H_s, H_o$  : matrizes de observação correspondentes ao modelo de medição ( $N_m \times n$ ), às restrições estruturais ( $N_s \times n$ ) e às restrições operacionais ( $N_o \times n$ ),

respectivamente;

$R$  : matriz de covariância dos erros de medição ( $N_m \times N_m$ );

$\lambda_m, \lambda_s, \lambda_o$  : multiplicadores de Lagrange correspondentes às medidas ( $N_m \times 1$ ), às restrições estruturais ( $N_s \times 1$ ) e às restrições operacionais ( $N_o \times 1$ ), respectivamente;

$z_m$  : vetor de medidas ( $N_m \times 1$ );

$P$  : matriz de covariância dos erros dos estados *a priori* ( $n \times n$ );

$\Delta \hat{x}^k$  : vetor de estados ( $n \times 1$ ).

## 2.10 CONCLUSÕES

A representação de chaves e disjuntores por ramos de impedância nula na modelagem de sistemas de potência, descrita neste capítulo, possibilita a generalização da estimação de estados e conseqüentemente a modelagem de redes no nível de subestação. A formulação da estimação de estado generalizada como um problema de otimização restrito, o fluxo de carga no nível de subestação e o estimador de estado linearizado são também descritos.

### 3 DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Quando o processo de estimação de estados falha em fornecer uma estimação com um grau de exatidão compatível aos desvios-padrão das quantidades estimadas pode-se concluir que ou as quantidades medidas possuem erros espúrios, ou o modelo da rede é incompatível com as quantidades medidas, ou ambos.

Assumindo-se que os parâmetros da rede são conhecidos, existem dois tipos de fontes de informações errôneas que podem ocorrer na modelagem de sistemas de potência em tempo real: erros grosseiros em medidas analógicas e erros nas informações digitais que reportam os *status* de chaves e disjuntores ou erros de topologia. Ambos são decorrentes de ruídos ou falhas no sistema de telemedição [16].

A presença de erros nestas informações compromete o resultado dos aplicativos nos quais são utilizados, tais como a estimação de estados, a análise de contingências e o fluxo de potência [8], [10]. As informações topológicas, por exemplo, são utilizadas pelo processador de topologia para definir o modelo barra-ramo da rede. Qualquer erro em *status* que não seja detectado pelo processador de topologia, resultará num modelo barra-ramo incorreto [22].

A seguir são apresentadas as metodologias para detecção e identificação de ambos os tipos de erros (topologia e medidas) que embasaram a proposta deste trabalho.

#### 3.2 DETECÇÃO DE ERROS VIA MULTIPLICADORES DE LAGRANGE NORMALIZADOS

Caso a estimação de estados resulte na existência de multiplicadores de Lagrange normalizados,  $\lambda^N$ , cujo valor absoluto seja superior a um limiar pré-estabelecido ( $\lambda_t=3$ , por exemplo, equivalente a probabilidade de cada medida

encontrar-se dentro do intervalo de 3 desvios-padrão), verifica-se a existência de erros na modelagem utilizada. Toda e qualquer informação, seja uma medida ou restrição operacional, cujo valor do respectivo MLN, resultante do processo de EESP, seja superior a um limiar pré-estabelecido ( $\lambda_i$ ) é considerada suspeita.

Pode-se demonstrar que quando um único erro está presente e é reportado ao estimador, o maior valor absoluto de  $\lambda^N$  ( $|\lambda_{\max}^N|$ ) corresponde a esta informação errônea. Esta mesma análise não é válida na ocorrência de erros múltiplos, devido ao efeito de espalhamento que estes podem provocar sobre os multiplicadores de Lagrange de outras medidas e/ou restrições [8].

Desse modo, considerou-se a ocorrência de erros ou detecção da existência de erros, quando da estimação de estados, resulta algum MLN cujo valor absoluto seja superior a um limiar pré-estabelecido ( $|\lambda_{\max}^N| > \lambda_i$ ), seja ele associado às restrições operacionais ou às medidas analógicas.

### 3.3 IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA TESTES GEOMÉTRICOS DE COLINEARIDADE (TESTE DO COSSENO)

Os testes geométricos ou a interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange foram utilizados inicialmente para garantir que todos os disjuntores erroneamente modelados fossem selecionados como suspeitos [14]. Neste sentido, utilizou-se deste método como uma ferramenta auxiliar para melhorar a eficiência dos métodos de identificação de erros de topologia [16], [13], [14], [15].

Devido a este método ser conceitualmente simples e sua implementação necessitar de pouco esforço computacional, em [17], os autores propõem uma abordagem alternativa para a identificação de erros de topologia, totalmente baseada no teste de colinearidade entre o vetor dos multiplicadores de Lagrange e as colunas da matriz de covariância correspondente.

Nesta proposta [17], o teste de colinearidade é executado em 2 etapas: a primeira, visa garantir que todos os disjuntores erroneamente modelados sejam

selecionados como suspeitos; a segunda, é aplicada a todos os elementos suspeitos até que o conjunto dos suspeitos seja reduzido apenas aos dispositivos com *status* errado.

Devido à utilização dos testes de colinearidade como a metodologia principal deste trabalho, a seguir, descreve-se a formulação completa do método apresentada em [17].

### 3.3.1 Teste do Cosseno para Erro Simples

Antes de avaliarem-se erros múltiplos, é preciso descrever o procedimento para o caso mais simples de um único erro. Para isso, considera-se que a rede é corretamente modelada pelas restrições e todas as medidas são perfeitas exceto pela informação  $j$ , que possui um erro  $\varepsilon_j$ . Assumindo que as informações *a priori* são desconsideradas, a equação (2.45) pode ser escrita como [17]

$$\lambda = v_j \varepsilon_j \quad (3.1)$$

onde:

$v_j$ :  $j$ -ésima coluna da matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange.

A equação (3.1) mostra que para um erro simples, os multiplicadores de Lagrange são colineares a  $v_j$ . A colinearidade de  $\lambda$  e cada coluna de  $V$  pode ser testada de modo a encontrarem-se informações contaminadas com erros. Além disso, é possível calcular o cosseno do ângulo entre  $\lambda$  e as colunas de  $V$  para determinar qual coluna ou colunas são colineares com  $\lambda$ .

Por razões computacionais, prefere-se não testar a colinearidade entre  $\lambda$  e  $v_i$ , e sim testar-se a colinearidade entre  $R^{1/2}\lambda$  e  $R^{1/2}v_i$  [17]. Seja  $\theta_i$  o ângulo entre  $R^{1/2}\lambda$  e  $R^{1/2}v_i$ , então

$$\cos \theta_i = \frac{\lambda^T R v_i}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(v_i^T R v_i)}} \quad (3.2)$$

Substituindo-se (3.1) em (3.2), tem-se:

$$\cos \theta_i = \frac{\varepsilon^T V^T R V \varepsilon_i}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(v_i^T R v_i)}} \quad (3.3)$$

onde:

$e_i$ :  $i$ -ésima coluna da matriz identidade  $V$ .

Desconsiderando-se as informações *a priori*, temos ainda que  $V = VRV^T$  e a equação (3.3) pode ser simplificada para:

$$\cos \theta_i = \frac{\lambda_i^N}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)}}. \quad (3.4)$$

### 3.3.2 Teste do Cosseno para Erros Múltiplos

Esta subseção aborda a ocorrência de erros múltiplos em medidas e/ou restrições. Para desenvolver o teste de colinearidade para erros múltiplos, a informação fornecida pela análise de criticidade e as magnitudes relativas dos multiplicadores de Lagrange são utilizados para particionar a matriz de covariância como [14]

$$V = [V_S \quad V_T \quad V_C] \quad (3.5)$$

onde:

$V_S$ : colunas linearmente independentes de  $V$  correspondentes às informações suspeitas;

$V_T$ : colunas de  $V$  correspondentes às informações livres de erro;

$V_C$ : colunas remanescentes de  $V$  correspondentes às informações críticas (colunas nulas) e aos  $k - 1$  membros de cada conjunto crítico suspeito.

Supondo-se que todas as medidas em  $T$  (medidas "verdadeiras") são perfeitas e que todas as restrições em  $T$  representam corretamente o modelo da rede, o vetor de erros  $\varepsilon$  pode ser escrito como

$$\varepsilon = [\varepsilon_S^T \quad 0 \quad \varepsilon_C^T]^T. \quad (3.6)$$

Assim como no caso do erro simples, descartam-se as informações *a priori* e assume-se que

$$\lambda = V\varepsilon. \quad (3.7)$$

De (3.5) e (3.7), os multiplicadores de Lagrange podem ser descritos por

$$\lambda = V_S \varepsilon_S + V_C \varepsilon_C. \quad (3.8)$$

A partição descrita em (3.5) implica que as colunas de  $V_S$  são linearmente independentes, bem como cada coluna de  $V_C$  pode ser escrita como uma combinação linear de colunas de  $V_S$  ( $V_C = V_S A$ ). Assim, (3.8) pode ser reescrita como [16]

$$\lambda = V_S \varepsilon_S + V_S A \varepsilon_C = V_S (\varepsilon_S + A \varepsilon_C) \quad (3.9)$$

$$\lambda = V_S \tilde{\varepsilon} \quad (3.10)$$

onde  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_S + A \varepsilon_C$ .

A equação acima mostra que no caso em que todas as informações errôneas (ou um de seus representantes no caso de conjuntos críticos) estão incluídas no grupo suspeito, o vetor  $\lambda$  estará no espaço vetorial de  $V_S$ .

Sempre que todas as medidas/restrições errôneas forem devidamente selecionadas como suspeitas, a equação (3.10) implica que o vetor  $\lambda$  deve estar no espaço vetorial de  $V_S$ , de modo que  $\theta = 0$  na ausência de erros aleatórios em medidas [16], [17] e [13]. Por outro lado, se ao menos uma medida errônea ou disjuntor com o *status* errado não está presente no grupo de suspeitos, então o multiplicador de Lagrange estará claramente fora do espaço vetorial de  $V_S$ , e o ângulo  $\theta'$  correspondente irá diferir significativamente de zero.

Assim como no caso do erro simples, por razões computacionais, testa-se a colinearidade entre  $R^{1/2}\lambda$  e  $R^{1/2}v_i$ , ao invés de  $\lambda$  e  $V_S$ . De modo que  $R^{1/2}\lambda$  esteja no espaço vetorial de  $R^{1/2}V_S$ , escreve-se  $R^{1/2}\lambda$  como a soma de seus vetores ortogonais:

$$R^{1/2}\lambda = p + q \quad (3.11)$$

onde  $p$  e  $q$  são respectivamente, as projeções de  $R^{1/2}\lambda$  nos espaços de  $R^{1/2}V_S$  e no complemento ortogonal deste.

Define-se o *operador projeção no espaço vetorial de  $R^{1/2}V_S$*  como

$$Proj\{.\} = R^{1/2}V_S(V_S^T R V_S)^{-1}V_S^T R^{1/2} \quad (3.12)$$

então a projeção  $p$  é dada por

$$p = Proj\{R^{1/2}\lambda\} = R^{1/2}V_S(V_S^T R V_S)^{-1}V_S^T R \lambda \quad (3.13)$$

e

$$q = R^{1/2}\lambda - p. \quad (3.14)$$

Pode-se verificar que  $p$  e  $q$  são ortogonais, ou seja,  $p^T q = 0$ .



Substituindo-se (3.10) em (3.13) nota-se que

$$p = R^{1/2} V_S (V_S^T R V_S)^{-1} V_S^T R V_S \tilde{\epsilon} \quad (3.15)$$

$$p = R^{1/2} \lambda. \quad (3.16)$$

Além disso, na hipótese de que todas as informações errôneas estão restritas ao grupo  $S$ , pode-se concluir de (3.14) e (3.15) que

$$q = 0. \quad (3.17)$$

A Figura 1 fornece uma interpretação gráfica do teste de colinearidade. Observar que devido à existência de erros aleatórios/ruídos, tem-se  $\theta \approx 0$  e ao invés de  $\theta = 0$ .

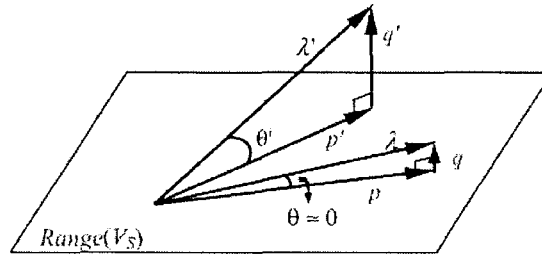


FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO TESTE GEOMÉTRICO DE COLINEARIDADE

As equações (3.15) e (3.17) mostram que na ocorrência de múltiplos erros somente entre os elementos do grupo suspeito  $S$ , os vetores  $p$  e  $R^{1/2} \lambda$  são colineares. Dessa forma, é possível verificar se o grupo suspeito  $S$  contém todas informações errôneas através do cálculo do cosseno do ângulo entre  $p$  e  $R^{1/2} \lambda$ . Seja  $\theta$  este ângulo, então

$$\cos \theta = \frac{p^T R^{1/2} \lambda}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(p^T p)}} \quad (3.18)$$

e substituindo-se (3.15) na equação acima, tem-se

$$\cos \theta = \frac{\lambda^T R V_S (V_S^T R V_S)^{-1} V_S^T R \lambda}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(\lambda^T R V_S (V_S^T R V_S)^{-1} V_S^T R \lambda)}} \quad (3.19)$$

que, após manipulações, pode ser reescrita como

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{\lambda^T R V_S (V_S^T R V_S)^{-1} V_S^T R \lambda}{(\lambda^T R \lambda)}}. \quad (3.20)$$

Assumindo-se que todas as informações, exceto aquelas presentes no grupo  $S$ ,

são corretas, o valor do  $\cos\theta$  calculado pela equação (3.20) será próximo a 1.0. Entretanto, se nem todas as informações inconsistentes forem rotuladas como suspeitas, então o valor do  $\cos\theta$  calculado pela equação (3.20) será significativamente diferente de 1.0. Estas propriedades serão exploradas para desenvolver o procedimento de identificação de erros de topologia descrito em 3.3.3.

Uma expressão mais simples para o cálculo do  $\cos\theta$  pode ser obtida da aproximação  $V \approx V^T R V$ , que é uma relação exata apenas na ausência de informações *a priori* [2].

Particionando-se o vetor de multiplicadores de Lagrange de acordo com a partição de  $V$  (3.5) e usando-se a aproximação acima, tem-se

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_T \\ \lambda_C \end{bmatrix} = V\tilde{\varepsilon} = V^T R V\tilde{\varepsilon} \quad (3.21)$$

$$\lambda = V^T R \lambda = \begin{bmatrix} V_s^T \\ V_T^T \\ V_C^T \end{bmatrix} R \lambda \quad (3.22)$$

e que

$$\lambda_s = V_s^T R \lambda. \quad (3.23)$$

A substituição de (3.23) em (3.20) resulta em

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{\lambda_s^T (V_s^T R V_s)^{-1} \lambda_s}{(\lambda^T R \lambda)}}. \quad (3.24)$$

Finalmente, definindo-se  $V_{ss} = V_s^T R V_s$ , a equação (3.24) pode ser simplificada para

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{\lambda_s^T (V_{ss})^{-1} \lambda_s}{(\lambda^T R \lambda)}}, \quad (3.25)$$

que fornece uma fórmula mais simples e compacta para o  $\cos\theta$ , cujos resultados são muito próximos àqueles fornecidos por (3.20), conforme apresentado em [17].

### 3.3.3 Algoritmo de Identificação de Erros de Topologia via Testes Geométricos de Colinearidade

A proposta descrita em [17], na qual os testes de colinearidade são usados como ferramenta principal no algoritmo de processamento de erros de topologia não necessita de nenhum procedimento estatístico adicional. Isto pode ser obtido aplicando-se o teste de colinearidade em dois estágios. No primeiro estágio, os testes têm a mesma função que em [16], [14] e [15], assegurando a inclusão de todos os dispositivos erroneamente modelados no grupo de suspeitos. No segundo estágio, os testes de colinearidade são empregados para eliminar de  $\lambda_s$  toda informação atualmente livre de erro, porém previamente rotulada como suspeita. Ao concluir-se a execução do algoritmo, o grupo de suspeitos conterá apenas as restrições relacionadas aos disjuntores cujos *status* estão erroneamente modelados.

É importante lembrar que anteriormente ao processo de estimação propriamente dito, é necessária a execução e investigação da análise de criticidade e observabilidade do sistema. Utilizam-se estes resultados para evitar restrições operacionais críticas e para contornar a singularidade da matriz  $V_{ss}$ .

O algoritmo é apresentado na seqüência, onde  $\lambda_t$  é o limiar para seleção dos dispositivos cujos *status* são considerados suspeitos (valor típico:  $\lambda_t = 3$ ), e  $\varepsilon_{cos}$  é um número positivo pequeno na faixa  $[0.01, 0.1]$ :

- a) Executar a análise de criticidade generalizada e determinar as informações críticas e os conjuntos críticos.
- b) Executar a estimação de estados generalizada e computar os multiplicadores de Lagrange normalizados para as restrições operacionais,  $\lambda_o^N$ . Seja  $\lambda_{o\_max}^N = \max |\lambda_{o,i}^N|$ .
  - Se  $|\lambda_{o\_max}^N| \leq \lambda_t$ , parar. Senão, um erro de topologia ocorreu. Proceder ao passo c).
- c) *Seleção de disjuntores suspeitos*: Selecionar como suspeitos todos os dispositivos chaveáveis para os quais  $|\lambda_{o,i}^N| > \lambda_t$ .

- d) Montar  $V_{ss}$  a partir das colunas linearmente independentes de  $V$  associadas aos disjuntores suspeitos utilizando-se o resultado da análise de criticidade.
- e) *Teste de colinearidade - Primeiro estágio*: Computar  $\cos\theta$  para o grupo suspeito usando-se as equações (3.20) ou (3.25).
  - Se  $\cos\theta \geq (1 - \varepsilon_{cos})$ , então todos os dispositivos com *status* errôneos já estão incluídos no grupo de suspeitos. Seguir para o passo f).
  - Se  $\cos\theta < (1 - \varepsilon_{cos})$ , ainda há dispositivos erroneamente modelados não inclusos no grupo de suspeitos. Baixar o limiar  $\lambda_i$  e retornar ao passo c).
- f) *Teste de colinearidade - Segundo estágio*: Remover temporariamente a informação  $i$  do grupo suspeito e computar  $\cos\theta$  (para  $i = 1, \dots, n_s$ ).
  - Se  $\cos\theta_i \geq (1 - \varepsilon_{cos})$ , então a informação  $i$  está livre de erro e deve ser eliminada do grupo suspeito.
  - Se  $\cos\theta_i < (1 - \varepsilon_{cos})$ , então a informação  $i$  está erroneamente modelada e deve permanecer no grupo de suspeitos.

### 3.4 IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA REESTIMAÇÃO

O algoritmo de identificação de erros de topologia apresentado em [8] utiliza a estimação de estado como um problema de otimização restrito, no qual os multiplicadores de Lagrange normalizados associados às restrições operacionais são calculados e utilizados para detectar e identificar erros de topologia.

Caso a estimação de estados resulte na existência de multiplicadores de Lagrange normalizados associados às restrições operacionais,  $\lambda_o^N$ , cujo valor absoluto seja superior a um limiar pré-estabelecido, verifica-se a existência de erros de topologia na modelagem utilizada.

Pode-se demonstrar que quando um único erro associado ao *status* de um

disjuntor seja erroneamente modelado e reportado ao estimador, o maior valor absoluto de  $\lambda_o^N$  ( $|\lambda_{o\_max}^N|$ ) corresponde à restrição deste mesmo disjuntor [8]. Esta mesma análise não é válida na ocorrência de múltiplos erros de topologia, devido ao efeito de espalhamento que estes podem provocar sobre os multiplicadores de Lagrange de outras medidas e/ou restrições [8].

Desse modo, na situação em que vários valores de  $|\lambda_o^N|$  ultrapassem o limiar pré-estabelecido, o processo de identificação é realizado pela verificação das diferentes combinações possíveis para os *status* dos disjuntores associados àqueles valores. Estes disjuntores, para os quais os  $|\lambda_{o,i}^N|$  são maiores que o limiar, são denominados *disjuntores suspeitos*.

O algoritmo para identificação de erros topológicos proposto em [8] consiste na reestimação e um novo cálculo dos MLN para todas as combinações de configurações possíveis entre os disjuntores suspeitos de conterem erro de modelagem. Desta forma, caso existam  $n_{ds}$  disjuntores suspeitos, existirão  $(2^{n_{ds}} - 1)$  combinações possíveis se *status* para este conjunto. O processo de identificação é finalizado quando todos os elementos em  $\lambda_o^N$  apresentarem valores menores que o limiar, e a combinação de *status* correspondente é identificada como a configuração correta dos disjuntores suspeitos.

### 3.5 IDENTIFICAÇÃO DE ERROS EM MEDIDAS ANALÓGICAS

Qualquer algoritmo de estimação de estado apropriado à monitoração de sistemas de potência deve ser capaz de identificar medidas errôneas e eliminar os erros por eles induzidos na base de dados final [18].

Medidas analógicas também podem ter erros significativos devido a ruído ou falha no sistema de telemedição. Quando estes erros são significativamente grandes, os resultados da estimação de estados pelo método dos mínimos quadrados ponderados tornam-se distorcidos e não confiáveis. Estes erros são usualmente detectados e identificados usando-se testes pós-estimação baseados nos resíduos normalizados das

medidas [30].

Os procedimentos de identificação de informações errôneas tornaram-se problemáticos e até mesmo ineficientes diante de erros múltiplos e correlacionados. Excetuando-se a identificação de um erro simples (especialmente em casos com grande redundância), problemas envolvendo múltiplos erros em medidas correlacionados ainda não haviam sido resolvidos satisfatoriamente até a década de 80.

No processamento de erros em medidas o desafio está relacionado as medidas errôneas correlacionadas, pois neste caso não se pode garantir que o maior e o menor resíduo de medição correspondem ao maior e ao menor erro respectivamente [27].

A identificação de erros analógicos em medidas via testes geométricos de colinearidade foi proposto em [7]. Neste trabalho, a metodologia de identificação de erros grosseiros em medidas analógicas utilizando testes geométricos de colinearidade foi aplicada analogamente à identificação de erros de topologia descrita na seção 3.3, substituindo-se as informações associadas às restrições operacionais dos disjuntores pelas informações associadas às medidas analógicas. Em [17] e [30], já se vislumbra a possibilidade de utilização destes testes também na identificação de grosseiros em medidas.

### 3.6 CONCLUSÕES

Este capítulo descreve o método de detecção de erros via MLN, bem como os métodos de identificação de erros de topologia e de erros grosseiros em medidas analógicas.

A interpretação geométrica do MLN na identificação de erros de topologia via testes de colinearidade é descrita detalhadamente. Além disso, descreve-se a metodologia de identificação de erros de topologia baseada em sucessivas reestimações de estado, que é útil quando o teste de colinearidade aponta como errônea uma informação pertencente a um conjunto crítico. Neste caso, o erro pode estar presente em qualquer uma das informações pertencentes ao conjunto crítico

correspondente. Apesar de os testes de hipóteses não terem sido utilizados neste trabalho, acredita-se que os mesmos executem eficientemente a tarefa descrita acima.

A interpretação geométrica dos MLN (testes de colinearidade), conforme proposto na literatura, é também válida para a identificação de erros em medidas.

## **4 DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO CONJUNTA DE ERROS DE TOPOLOGIA E DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS ANALÓGICAS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Um ponto importante que até o momento não recebeu muita atenção está relacionado à solução de problemas envolvendo erros de topologia e erros em medidas simultaneamente [24]. A verificação do comportamento do estimador de estados e do comportamento dos métodos atualmente utilizados diante de ambos os tipos de erros ainda não foi satisfatoriamente abordado, mesmo sabendo-se que a confiabilidade da tecnologia de estimação de estado para identificação de erros diminui nos casos em que erros de topologia estão presentes simultaneamente com erros em medidas [27].

O objetivo deste trabalho é apresentar um algoritmo capaz de identificar a natureza do erro detectado, seja ele um erro de topologia ou erro em uma medida analógica, bem como processar e identificar corretamente erros de topologia e em medidas que venham a ocorrer simultaneamente, em uma mesma estimação de estados.

Neste sentido, primeiramente os erros de topologia e em medidas foram avaliados e simulados separadamente de modo a verificar-se o comportamento dos MLN e do teste de colinearidade em cada caso. Posteriormente simularam-se ambos os erros simultaneamente. Este procedimento visou definir o comportamento do estimador de estados diante de ambos os casos, separadamente ou em conjunto, e verificar se a análise deste comportamento fornece informações que possam subsidiar a inferência da existência ou não de cada um destes tipos de erros.

No desenvolvimento desse trabalho utilizam-se os conceitos de observabilidade e criticidade [13], [31], uma abordagem baseada no método do *Tableau* e técnicas de estimação de estado conforme proposto por Monticelli [4] e Clements e Simões Costa [31]. Para processamento do conjunto de medidas utiliza-se



o método dos mínimos quadrados ponderados, além de buscar-se a identificação de conjuntos e de medidas críticas.

A estimação de estados generalizada [4], [2], é tratada como um problema de otimização [8], [10], onde as equações das medidas, barras de injeção nula, barra de referência, e restrições operacionais, que representam os *status* dos disjuntores modelados no sistema, são incluídas como restrições de igualdade [13], [11], [10].

Para as simulações realizadas e no desenvolvimento do algoritmo proposto utilizararam-se ainda as seguintes considerações:

- a) Modelo linearizado da rede elétrica;
- b) Fluxo de carga e detalhamento dos sistemas no nível de subestação proposto recentemente em [34] e [35], que permite a avaliação dos fluxos nos disjuntores;
- c) Realização da análise de criticidade;
- d) Conhecimento prévio da localização da zona de anomalia conforme proposto em [12] e [36];
- e) Detecção de erro quando o maior MLN for superior ao limiar  $(|\lambda_{máx}^N| > \lambda_t = 3)$ ;
- f) Testes geométricos de colinearidade na identificação de erros [17].

A seguir apresentam-se as constatações da verificação da natureza do erro e a proposta de um único algoritmo para identificação destes tipos de erros. Ao final do capítulo, descrevem-se algumas considerações adicionais e observações pertinentes à ao desenvolvimento e funcionamento do algoritmo proposto. Além disso, um novo algoritmo baseado nos testes de colinearidade é apresentado.

## 4.2 NATUREZA DOS ERROS DETECTADOS

Em uma aplicação real não se sabe qual o tipo de informação disponível contém erros. Além disso, não se sabe se a detecção de erros refere-se à ocorrência de erros simples ou múltiplos de uma única fonte, seja de topologia ou em medidas

analógicas, ou se erros simultâneos em medidas e topologia estão presentes.

Além da importância desta identificação perante o desconhecimento prévio de qual tipo de erro pode estar presente nos resultados de uma estimação de estados, a correta seleção das metodologias de identificação de erros também se faz necessária. Grande parte das metodologias publicadas concentra-se nas informações pertinentes à identificação do tipo de erro que se deseja identificar, cuja análise só é possível sabendo-se antecipadamente qual tipo de erro foi simulado.

Na sequência apresentam-se: a metodologia elaborada neste trabalho para a determinação da natureza do erro via testes de colinearidade, a comprovação da mesma e o comportamento observado a partir dos testes e simulações realizados utilizando-se esta metodologia.

#### 4.2.1 Testes de Colinearidade Aplicados à Determinação da Natureza do Erro

Quando o teste de detecção aponta a existência de erros ( $|\lambda_{máx}^N| > 3$ ), a verificação de qual é a natureza de um erro, seja ele proveniente de um erro grosseiro em medida ou de um erro de topologia, é realizada neste trabalho baseada na interpretação: dos MLN das medidas e restrições e da colinearidade entre os multiplicadores de Lagrange e suas respectivas matrizes de covariância, conforme descrito a seguir. Os testes de colinearidade foram aplicados em duas condições: a todas as restrições operacionais de disjuntores ( $\cos\theta_o$ ) e a todas as informações referentes às medidas analógicas ( $\cos\theta_m$ ).

Inicialmente aplicou-se o teste de colinearidade para o conjunto formado por todas as restrições operacionais ( $o$ ). A partir da equação (3.25), define-se este teste como

$$\cos\theta_o = \sqrt{\frac{\lambda_o^T (V_{oo})^{-1} \lambda_o}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.1)$$

onde:

$\lambda_o$ : vetor contendo todos os multiplicadores de Lagrange relacionados às

restrições operacionais ( $1 \times N_D$ );

$\lambda$ : vetor contendo todos multiplicadores de Lagrange ( $1 \times NI$ );

$R$ : Matriz de covariância dos erros de medição ( $N_m \times N_m$ ), conforme equação (2.41);

$V_{oo}$ : matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange relacionados às restrições operacionais ( $N_D \times N_D$ );

$N_D$ : número de disjuntores modelados;

$NI$ : número total de informações referentes às restrições do problema de otimização, representando a soma do número de medidas ( $N_m$ ), de barras de referência ( $N_r$ ), de barras de injeção nula ( $N_{str}$ ) e de disjuntores ( $N_D$ ).

Analogamente à equação (4.1) define-se o teste de colinearidade para o conjunto formado por todas as medidas analógicas ( $m$ ), a partir da equação (3.25), como:

$$\cos \theta_m = \sqrt{\frac{\lambda_m^T (V_{mm})^{-1} \lambda_m}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.2)$$

onde:

$\lambda_m$ : vetor contendo todos os multiplicadores de Lagrange relacionados às medidas analógicas ( $1 \times N_m$ );

$V_{mm}$ : matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange relacionados às medidas analógicas ( $N_m \times N_m$ ).

O objetivo dos testes definidos em (4.1) e (4.2) é o de analisar e identificar um comportamento que permita auxiliar o processo de inferência sobre a existência ou não de cada tipo de erro.

#### 4.2.1.1 Comprovação da interpretação geométrica aplicada à determinação da natureza do erro

Esta abordagem do teste comporta-se analogamente à partição já realizada e descrita em [14]. Entretanto, ao invés de dividir-se o conjunto de informações em

informações verdadeiras (livres de erro), suspeitas de conter erro e críticas, conforme a equação 3.5, faz-se a seguinte partição:

- a)  $m$  - conjunto contendo todas as informações referentes às medidas analógicas;
- b)  $o$  - conjunto contendo todas as restrições operacionais de disjuntores;
- c)  $st$  - conjunto contendo todas as restrições estruturais.

Assume-se, conforme descrito na equação 3.7, que

$$\lambda = V\varepsilon. \quad (4.3)$$

Deste modo, particiona-se a matriz de covariância do seguinte modo

$$V = [V_m \ V_o \ V_{st} \ V_c] \quad (4.4)$$

onde:

$V_m$ ,  $V_o$ ,  $V_{st}$ : colunas de  $V$  correspondentes às medidas analógicas, às restrições operacionais (disjuntores) e às restrições estruturais, respectivamente;

$V_c$ : colunas remanescentes de  $V$  correspondentes às informações críticas (colunas nulas) e aos  $k-1$  membros de cada conjunto crítico suspeito.

Assume-se que as restrições operacionais, que contém apenas informações determinísticas, estão livres de erros.

EXEMPLO: Erro de uma única natureza

Se todos os dados contidos no conjunto  $m$  estiverem corretos e o conjunto  $o$  contiver algum erro de modelagem, então o vetor de erros  $\varepsilon$  pode ser escrito como

$$\varepsilon = [\varepsilon_o^T \ 0]^T. \quad (4.5)$$

onde:

$\varepsilon_o$ : vetor de erros correspondente ao conjunto de restrições operacionais (disjuntores).

Substituindo-se (4.5) em (4.3), tem-se que

$$\lambda = V_o \varepsilon_o. \quad (4.6)$$

A equação acima mostra que se apenas o conjunto  $o$  (disjuntores) contiver erro, o vetor  $\lambda$  estará no espaço vetorial de  $V_o$ , ou seja,  $\lambda$  será colinear a  $V_o$  e o valor do  $\cos\theta_o$  será aproximadamente 1.

Da mesma forma, se o conjunto  $m$  (medidas) contiver erros e o conjunto  $o$  (disjuntores) contiver apenas informações verdadeiras, têm-se analogamente que

$$\lambda = V_m \varepsilon_m, \quad (4.7)$$

bem como o valor do  $\cos \theta_m$  será aproximadamente 1.

EXEMPLO: Erros conjuntos de topologia e em medidas

Caso ambos os conjuntos,  $o$  (disjuntores) e  $m$  (medidas), contenham erros, então o vetor  $\lambda$  não será colinear nem com  $V_o$  nem com  $V_m$ . Dessa forma, os valores do  $\cos \theta_m$  e do  $\cos \theta_o$  para os dois testes diferiram significativamente de 1.

Neste caso, aplicando-se o teste de colinearidade para todo o conjunto de informações ( $\cos \theta_{m+o}$ ), o valor do cosseno resultante do teste será próximo de 1, pois este conjunto sim conterà todos os erros.

#### 4.2.2 Comportamento da Natureza dos Erros Detectados

Constatou-se nos testes realizados a dificuldade de análise na ocorrência de erros de topologia múltiplos ou erros simultâneos na topologia da rede e em medidas, nos quais tanto restrições operacionais ( $o$ ) quanto medidas ( $m$ ) aparecem entre os suspeitos. Neste caso, não se pode garantir que se tenham apenas erros de topologia, ou se há também a ocorrência simultânea destes com erros grosseiros em medidas. Por isto, verificou-se que esta indagação não possui uma resposta correta e confiável a partir de um único parâmetro, conforme será apresentado na Tabela 1 e discutido na seção 6.1.

De modo a balizar e justificar o método proposto de análise da natureza do erro, a Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados e constatações obtidos para os testes com diferentes tipos e valores de erros. Para este fim, utilizaram-se os sistemas e planos de medição descritos no capítulo 5 deste trabalho.

Como se pode observar na Tabela 1,

- a) Na ausência de erros não há ocorrência de MLN superiores ao limiar, bem como o  $\cos \theta_o$  e o  $\cos \theta_m$  são significativamente diferentes de 1.

- b) Na ocorrência apenas de erros grosseiros em medidas (simples ou múltiplos):
- Os suspeitos ( $|\lambda^N| > \lambda_t$ ) contêm apenas medidas, exceto na ocorrência de erros não identificáveis, em cuja presença, restrições operacionais podem figurar entre os suspeitos;
  - O valor do  $\cos \theta_o$  difere significativamente de 1, exceto apenas quando erros em medidas de fluxo em disjuntor estão presentes;
  - O valor do  $\cos \theta_m$  é próximo a 1.
- c) Na ocorrência apenas de erros de topologia (simples ou múltiplos):
- Os suspeitos ( $|\lambda^N| > \lambda_t$ ) contêm medidas e restrições operacionais;
  - O valor do  $\cos \theta_o$  é próximo a 1;
  - O valor do  $\cos \theta_m$  é significativamente diferente de 1 e seu valor é sempre menor que  $1 - \varepsilon_{\cos}$ .
- d) Na ocorrência conjunta de erros de topologia e medidas:
- O conjunto dos suspeitos ( $|\lambda^N| > \lambda_t$ ) contém medidas e restrições operacionais;
  - O valor do  $\cos \theta_o$  foi superior a 0.5 para todos os testes simulados, valor este proposto como o limiar de indicação de erros de topologia e denotado como  $\cos_{top}$ .

TABELA 1 - COMPORTAMENTO DA NATUREZA DOS ERROS DETECTADOS

PRESENÇA DE ERROS		COMPORTAMENTO			
TOPOLOGIA	MEDIDAS	SUSPEITOS ( $ \lambda^N  > \lambda_t = 3$ )		TESTE DE COLINEARIDADE	
		TOPOLOGIA	MEDIDAS	$\cos \theta_o$	$\cos \theta_m$
Não	Não	Não	Não	$\cos \theta_o < 1$	$\cos \theta_m < 1$
Não	Sim	Não	Sim	$\cos \theta_o < 1 - \varepsilon_{\cos}$	$\cos \theta_m > 1 - \varepsilon_{\cos}$
Sim	Não	Sim	Sim	$\cos \theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos}$	$\cos \theta_m < 1 - \varepsilon_{\cos}$
Sim	Sim	Sim	Sim	$\cos_{top} < \cos \theta_o$	Não possui comportamento definido

Os resultados completos da verificação da natureza do erro são apresentados na seção 6.1.

### 4.2.3 Metodologia para Determinação da Natureza do Erro

Baseado nas constatações descritas na seção anterior e à necessidade de desenvolver o melhor mapeamento possível na análise da natureza do erro, a proposta apresentada utiliza-se da verificação de dois parâmetros pertinentes: os valores absolutos dos MLN e valor do teste de colinearidade aplicado ao conjunto contendo todas as informações associadas às restrições operacionais ( $\cos\theta_o$ ).

Constatou-se nos casos simulados uma tendência dos MLN associados às restrições operacionais serem pouco sensíveis à presença de erros em medidas, ao contrário dos MLN associados às medidas, que são sensíveis a presença de erros de topologia. Por isso, neste trabalho, baseando-se na experiência adquirida com os casos simulados, propõe-se o seguinte teste na presença de informações suspeitas ( $|\lambda^N| > \lambda_t$ ):

- a) Se  $\cos\theta_o > \cos_{top}$  e  $|\lambda_{0\_máx}^N| > \lambda_t$ , garante-se a presença de erros de topologia, sejam eles unicamente de topologia ou em simultaneidade com erros de medidas;
- b) Caso contrário, dentre os suspeitos ( $|\lambda^N| > \lambda_t$ ) haverá apenas informações associadas às medidas analógicas ( $m$ ), e, portanto garante-se a presença de erros unicamente em medidas analógicas.

### 4.2.4 Considerações Adicionais da Natureza dos Erros Detectados

A seguir apresentam-se alguns casos específicos cujo comportamento difere do descrito na Tabela 3. Nos casos abaixo descritos, demonstra-se que apesar desta divergência, a metodologia descrita na seção anterior (4.2.3) é válida.

Na ocorrência apenas de erros em medidas não identificáveis (erro em uma medida pertencente a um conjunto crítico), restrições operacionais podem figurar entre os suspeitos. Entretanto, nesta situação específica o  $\cos\theta_o < \cos_{top}$ .

Na ocorrência apenas de erros em medidas de fluxo em disjuntores o  $\cos\theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos}$ , entretanto neste caso, a ocorrência de erro de topologia pode ser descartada devido à inexistência de restrições operacionais entre os suspeitos.

Quando a inequação  $\cos \theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos}$  for satisfeita, apesar de esta afirmação garantir a presença de erros de topologia, ela não é suficiente para garantir que erros grosseiros em medidas estejam ou não presentes.

Em vários casos, figuraram restrições estruturais entre os suspeitos. Porém, os mesmos não foram avaliados, pois assumiu-se que os mesmos não possuem erros, bem como não fazem parte do escopo deste trabalho.

Alguns resultados obtidos para os sistemas, testes e casos simulados (ver Capítulo 6), para um erro simples, merecem destaque

a) Na presença de apenas 1 erro de topologia:

- O  $|\lambda_{máx}^N|$  corresponde ao disjuntor erroneamente modelado [8];
- A condição  $\cos \theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos}$  é satisfeita, uma vez que há apenas erros de topologia;

b) Na presença de apenas 1 erro grosseiro em medida:

- O  $|\lambda_{máx}^N|$  corresponde à medida errônea;
- Os  $|\lambda_o^N|$ , referentes às restrições operacionais, serão menores que  $\lambda_t$ .
- A condição  $\cos \theta_m > 1 - \varepsilon_{\cos}$  é satisfeita, uma vez que há apenas erros em medidas.

### 4.3 ANÁLISE CONJUNTA DE ERROS DE TOPOLOGIA E EM MEDIDAS ANALÓGICAS

Embora a proposta apresentada em [29] permita que o processamento de erros de topologia e em medidas seja realizado simultaneamente, o artigo não apresenta o resultado de nenhum teste em que ambos os tipos erros sejam simulados e avaliados conjuntamente. Além disso, também não apresenta a validação do método comparando-os com resultados e testes difundidos na comunidade acadêmica. Em [22], apesar de ilustrar-se um exemplo em que erros em medidas e em *status* são avaliados em conjunto, apenas um teste foi realizado, e para um sistema pequeno de 12



barras.

Em vista disso, a contribuição deste trabalho vem ao encontro desta lacuna, a verificação e identificação conjunta de erros de topologia e medidas.

A análise e a determinação da natureza do erro e do comportamento do estimador diante de cada tipo de erro, de topologia ou em medidas, conforme descritos anteriormente permitem a proposição do método a seguir no qual se utiliza um único algoritmo para tratamento de ambos os tipos de erros. Nesta proposta, o processo de identificação via testes de geométricos de colinearidade e a correção de erros, é executado separadamente para cada tipo de erro presente.

#### 4.3.1 Análise Conjunta de Erros de Topologia e em Medidas Analógicas: Tratamento Segregado

Nesta proposta analisam-se e corrigem-se primeiramente os erros de topologia, quando ocorrerem, devido a este tipo de erro se espalhar sobre medidas analógicas corretas. Se houverem apenas erros de topologia e os mesmos sejam corrigidos, após uma reestimação não serão detectados novos erros.

Na ocorrência de erros de topologia, o algoritmo proposto processa a detecção, a identificação via testes geométricos de colinearidade (seção 3.3) e a correção dos *status* dos disjuntores erroneamente reportados ao estimador. Após este processamento, o estimador é executado novamente e, caso ainda seja detectada a presença de erros, processa-se a detecção, identificação via testes geométricos de colinearidade (seção 3.5) e correção de erros em medidas analógicas. Caso ocorram apenas erros grosseiros em medidas, a identificação e a correção destas medidas errôneas são executadas diretamente.

Na ocorrência simultânea de erros de topologia e em medidas, após a correção dos erros de topologia e de uma reestimação, o teste de detecção indicará que ainda existem erros. A análise da natureza do erro apontará que ainda há erros em medidas, executando-se na seqüência, a identificação destas informações errôneas.

Como o algoritmo visa à análise conjunta de erros de topologia e em medidas, adotou-se o procedimento de realizar uma reestimação de estados após cada ciclo de detecção-identificação das informações errôneas de cada tipo, topologia e medidas. Dessa forma, o algoritmo apenas deixará de executar os processos de identificação de erros quando os mesmos não mais forem detectados, ou seja, todos o módulo de todos os MLN (referente às medidas e às restrições operacionais) forem menores do que o limiar ( $\lambda_r$ ).

A figura 2 apresenta o algoritmo completo para a identificação conjunta de erros de topologia em medidas proposto, e compreende:

- a) *Simulação do sistema de potência real*: simula o sistema de potência real por meio dos parâmetros definidos para cada sistema teste, por meio da execução do fluxo de carga linearizado no nível de subestação e da implementação de erros aleatórios às medidas reais de modo a simular a incerteza dos equipamentos de medição.
- b) *Inclusão de erros de modelagem*: implementa erros de modelagem para verificação da capacidade de detecção e identificação de erros do algoritmo. Estes erros podem ser nos *status* de disjuntores ou nos valores das medidas analógicas de injeção de potência, fluxo de potência nas linhas de transmissão ou fluxo de potência nos disjuntores.
- c) *Detecção de erros*: Nesta etapa, os resultados da estimação de estados são analisados executando-se o teste de detecção baseado no valor dos MLN das restrições e medidas do problema de otimização restrito.
- d) *Análise da natureza do erro*: caso verifique-se a existência de erros, executam-se as análises de natureza do erro e de criticidade. A interpretação do resultado da natureza do erro é utilizada para definir a ordem de identificação de erros: se houverem erros em *status* de disjuntores, estes serão tratados por primeiro, independentemente de sua ocorrência simultânea ou não com erros em medidas.

- e) *Identificação de erros de topologia*: quando análise da natureza do erro aponta a existência de erros de topologia, executa-se a identificação via testes de colinearidade. Caso o disjuntor identificado como errôneo nesta etapa pertença a um conjunto crítico, executar-se-ão sucessivas reestimações considerando-se as possíveis combinações de *status* dos disjuntores pertencentes ao mesmo conjunto crítico da informação selecionada como errônea pelo teste de colinearidade.
- f) *Identificação de erros grosseiros em medidas*: quando a análise da natureza do erro aponta a existência de erros em medidas, executa-se a identificação via testes de colinearidade.
- g) *Correção de erros*: após cada processo de identificação, os *status* dos disjuntores errôneos são corrigidos e as medidas contendo erros grosseiros são descartadas, executando-se a estimação de estados até que o teste de detecção não mais indique a presença de erros.

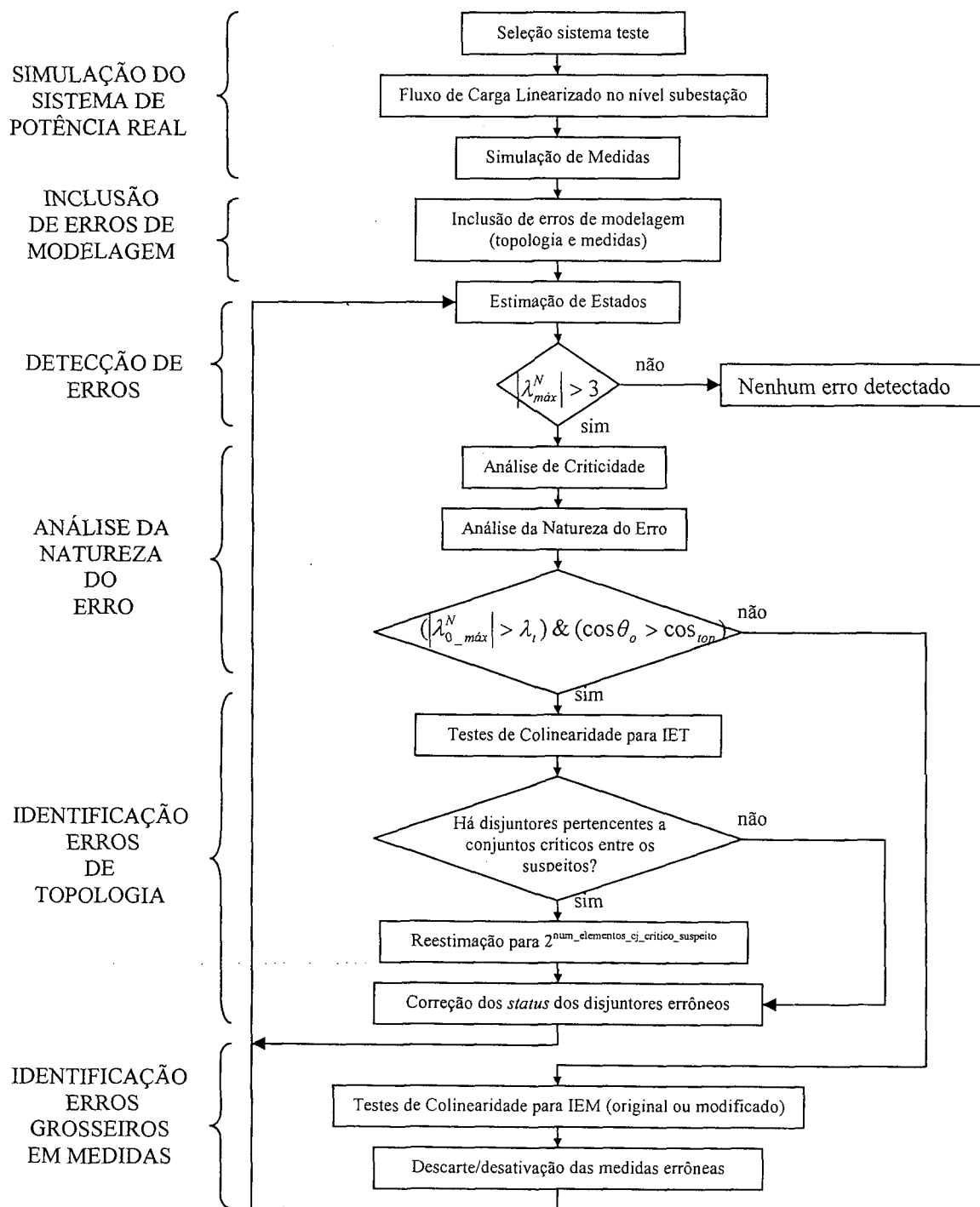


FIGURA 2 - ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO CONJUNTA DE ERROS DE TOPOLOGIA E EM MEDIDAS

#### 4.3.2 Considerações Adicionais da Identificação Conjunta de Erro de Topologia e em Medidas

Obteve-se um melhor resultado e aumentou-se a eficiência do teste de colinearidade, ordenando-se as informações suspeitas de acordo com o valor absoluto dos respectivos MLN, e excluindo-se, na segunda etapa do teste de colinearidade, as informações dos menores para os maiores valores absolutos dos MLN. Análise esta coerente, uma vez que as informações portadoras de erro se encontraram com maior probabilidade dentre aquelas que possuam os maiores valores absolutos dos MLN.

##### 4.3.2.1 Identificação de erros em medidas analógicas

Inicialmente, o teste de colinearidade conforme concebido em [17] para a identificação de erros de topologia se mostrou ineficiente para a identificação de erros grosseiros em medidas, tanto simples quanto múltiplos. Dos testes realizados verificou-se que o número de informações suspeitas resultantes do 1º estágio torna-se muito grande e há a tendência em indicar como errônea uma medida correta relacionada àquela que de fato é portadora do erro. Quando da verificação do algoritmo perante erros múltiplos, o resultado nem sempre apresentava a identificação de todos os errôneos.

Após análise minuciosa, percebeu-se a existência de várias medidas com valores similares (quase idênticos) de MLN, que ocorre para medidas relacionadas. Isso se deve a utilização do modelo linear da rede elétrica e leva a ocorrência de problemas numéricos. Este problema foi contornado mantendo-se apenas um único representante de cada valor de MLN idêntico na execução do teste de colinearidade.

Com esta alteração a identificação de erros simples apresentou resultados satisfatórios. No caso em que erros múltiplos ou de falha em unidades terminais remotas (UTR) estão presentes, nem sempre todas as informações errôneas são apontados. Entretanto, efetuando-se reestimações após cada execução do teste de colinearidade para a identificação de erros em medidas (IEM), o algoritmo é eficaz na

identificação de todos os erros grosseiros em medidas.

Por exemplo, supondo-se a existência de erros em oito medidas  $(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8)$ :

- a) A primeira execução do teste de colinearidade para IEM aponta como errôneos apenas quatro deles  $(z_1, z_3, z_4, z_7)$ ;
- b) Efetuando-se a correção destas medidas, uma reestimação e executando-se novamente o teste de colinearidade para IEM, tem-se a identificação de outras três medidas errôneas  $(z_2, z_5, z_8)$ ;
- c) Efetuando-se a correção destas medidas, uma reestimação e executando-se novamente o teste de colinearidade para IEM, tem-se a identificação da última medida errônea  $(z_6)$ , e dessa forma a correta identificação de todas as medidas errôneas.

Em vista destas dificuldades identificadas (grande número de suspeitos e necessidade de reestimações) propôs-se e utilizou-se o teste de colinearidade modificado (encadeado) apresentado na seção 4.4.

#### 4.3.2.2 Ajuste das condições de teste

O algoritmo proposto para identificação conjunta de erros de topologia e em medidas necessitou de alterações nas condições de teste com relação a proposta apresentada em [17], substituindo-se o valor máximo do cosseno (1) da condição  $1 - \varepsilon_{\cos}$ , pelo valor do  $\cos \theta_m$  na IEM e pelo valor do  $\cos \theta_o$  na IET. Esta modificação justifica-se porque na ocorrência conjunta de erros de topologia e de medidas os resultados obtidos para cada teste de colinearidade (disjuntores e medidas) serão significativamente inferiores 1, uma vez que nenhum dos conjuntos contém todas as informações errôneas. Estas alterações melhoram a eficiência das condições de inclusão/exclusão de informações e critérios de parada dos procedimentos de identificação de erros.

Por exemplo, supondo-se a existência de erro no *status* de um disjuntor ( $d_1$ ) e

do erro grosseiro em uma medida ( $z_1$ ) relacionada a este disjuntor (medida de injeção de potência em uma barra), o valor  $\cos\theta_o$  incluindo todas as restrições operacionais será  $\cos\theta_o = 0.894$  e haverá restrições operacionais entre os suspeitos, indicando a existência de erros de topologia. Conforme descrito, o processo será executar primeiramente a IET. Entretanto, a condição de parada do teste de colinearidade para IET,  $\cos\theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos} = 0.9 > 0.894$ , não será satisfeita e o procedimento de identificação falhará.

#### 4.3.2.3 Análise de criticidade

Cabe lembrar que o teste de colinearidade é afetado pela criticidade da configuração do sistema [17], pois os MLN e as colunas da matriz de covariância correspondentes a dois elementos pertencentes a um mesmo conjunto crítico são colineares [16], distorcendo dessa forma o resultado do teste de colinearidade. Na ausência de *informações a priori*, os MLN de elementos pertencentes a um mesmo conjunto crítico possuem valores absolutos iguais. Dessa forma, caso existam entre os suspeitos, duas ou mais informações pertencentes a um mesmo conjunto crítico,  $V_{ss}$  será singular, e o teste de colinearidade não pode ser aplicado, acarretando na perda de eficiência na identificação de erros.

Devido à influência da criticidade das informações no resultado do teste de colinearidade, e de sua dependência com a configuração atual do sistema (topologia e plano de medição), a análise de criticidade deve ser realizada em tempo real a cada nova estimacão. Esta operação deve ser realizada porque a análise de criticidade só é válida para aquela configuração reportada ao estimador ou configurador de redes.

Assim, o algoritmo de identificação proposto é precedido pela análise de criticidade, cujos resultados são utilizados para melhorar o desempenho do algoritmo de identificação de erros, conforme proposto em [17].

Na identificação de erros de topologia, caso haja alguma informação suspeita que seja crítica, ou mais de um elemento de um mesmo conjunto crítico entre os

suspeitos, excluem-se do conjunto suspeito todas as informações críticas e mantém-se apenas um elemento de cada conjunto crítico (dentre aqueles que são suspeitos) [17]. Se o resultado do teste de colinearidade aponta como errônea uma informação pertencente a um conjunto crítico, não é possível garantir que esta informação seja a informação erroneamente modelada [17].

Nesses casos, o procedimento proposto na seção seguinte (4.3.2.4) é adotado.

#### 4.3.2.4 Conjunto crítico selecionado como suspeito

Quando uma restrição pertencente a um conjunto crítico é apontada pelo teste de colinearidade como errônea, qualquer um dos elementos deste conjunto pode ser a informação que efetivamente apresenta o erro, não sendo possível garantir que este resultado é o correto, ou seja, este erro é detectável mas não identificável.

Dessa forma, deve-se realizar uma nova operação para determinar qual informação pertencente a este conjunto crítico selecionado é realmente a informação errônea. Faz-se necessária a utilização de outras técnicas para a correta identificação de erros de topologia deste ponto em diante (reestimação). Por isso, antes de cada cálculo do cosseno, retiram-se do conjunto suspeito as informações críticas e mantém-se apenas uma informação representante de cada conjunto crítico, na ocorrência de cada uma destas situações. Deste modo, a retirada de restrições operacionais críticas do conjunto suspeito e a manutenção de apenas um único representante de cada conjunto crítico (seção 3.3) visam tornar possível a aplicação do teste de colinearidade.

Nesta situação, o modo mais simples de finalizar o processo de identificação, porém mais caro em termos computacionais, é realizar sucessivas reestimações considerando-se as possíveis combinações de *status* dos disjuntores pertencentes ao mesmo conjunto crítico da informação selecionada como errônea pelo teste de colinearidade. A configuração correta é obtida quando o resultado da estimação fornecer valores absolutos de MLN menores que o limiar  $\lambda_i$  [8].



#### 4.4 TESTE DE COLINEARIDADE MODIFICADO (ENCADEADO)

Tendo em vista a constatação da existência de um grande número de medidas suspeitas quando erros em medidas estão presentes, a possibilidade em executar o teste de colinearidade em apenas um estágio e a possibilidade futura em executar-se o teste de colinearidade para as informações associadas aos disjuntores e às medidas simultaneamente, desenvolveu-se a metodologia descrita a seguir.

Esta modificação do teste de colinearidade visa explorar a característica de que as informações errôneas possuem grandes valores absolutos de MLN.

Primeiro, supondo-se o teste mais simples, ou seja, um erro grosseiro em uma única medida, o valor do cosseno aplicado ao conjunto formado unicamente pela medida detentora do maior MLN, será aproximadamente igual a 1 ( $\cos \theta_{\max(m)} > 1 - \varepsilon_{\cos}$ ), pois é a única contaminada com erro grosseiro. Este procedimento é respaldado pela literatura que mostra que o maior MLN, na ocorrência de um erro simples, corresponde à informação errônea [7].

Sendo assim, no algoritmo proposto, seleciona-se inicialmente como suspeita apenas a informação com maior valor absoluto do MLN. Avalia-se o valor do cosseno para esta única informação. No caso de tratar-se de um erro simples, o valor do cosseno do conjunto suspeito formado por esta única informação será aproximadamente igual a 1 ( $\cos \theta_{\max(m)} > 1 - \varepsilon_{\cos}$ ), indicando que esta é a única informação errônea. Caso contrário, ainda existem outras informações errôneas presentes, e o processo continua, incluindo aos suspeitos aquela medida que possui o segundo maior valor absoluto dentre os MLN. O valor do  $\cos \theta$  é novamente avaliado. A medida incluída é mantida no conjunto suspeito somente se esta causa aumento significativo no valor do cosseno, caso contrário ela é eliminada do conjunto, o que significa considerar que a mesma está livre da suspeita de conter erro de modelagem.

O exemplo abaixo ilustra o procedimento proposto para o caso de erros múltiplos, indicado na Tabela 2, para a sub-rede relevante do sistema de 30 barras do IEEE (19 barras).

TABELA 2 - EXEMPLO TESTE DE COLINEARIDADE MODIFICADO PARA ERROS MÚLTIPLOS EM

MEDIDAS - SUB-REDE RELEVANTE DO IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS)				
MEDIDA	TIPO	INFORMAÇÃO	VALOR REAL [p.u.]	VALOR SIMULADO[p.u.]
15	fluxo disj.	2-9	-0,275	-0,330
16	fluxo disj.	2-10	-0,170	-0,204
17	fluxo disj.	2-13	0,070	0,084
23	injeção p	2	-0,120	-0,144

TABELA 3 - EXEMPLO TESTE DE COLINEARIDADE MODIFICADO - INFORMAÇÕES SUSPEITAS

MEDIDA	TIPO	INFORMAÇÃO	MLN
15	fluxo disj	2-9	-44.3022
16	fluxo disj	2-10	27.7807
1	fluxo disj	1-9	-15.7101
22	injeção p	1	-15.7101
2	fluxo t	1-9	15.7101
17	fluxo disj	2-13	12.5535
3	fluxo disj	3-10	-10.1834
24	injeção p	3	-10.1834
4	fluxo disj	10-3	10.1834
23	injeção p	2	-3.5580
9	fluxo disj	6-13	3.2714
10	fluxo disj	13-6	-3.2714
27	injeção p	6	3.2714

A Tabela 3 apresenta todas as informações com  $|\lambda^N| > 3$ .

O processo de identificação proposto é o seguinte:

- Primeiramente calcula-se o valor do cosseno da informação que apresenta o maior MLN ( $\cos\theta_{\max(m)}$ ), similarmente a equação 4.2:  
 $\cos\theta(z_{15}) = 0.7943$ .
- Se  $\cos\theta > 1 - \varepsilon_{\cos}$ , erro simples detectado. Para processo de identificação. Caso contrário ir para o passo c).
- Em seguida, inclui-se o elemento associado ao segundo maior valor de MLN,  $z_{16}$ , no conjunto suspeito e calcula-se o valor do cosseno para o novo conjunto suspeito:  $\cos\theta(z_{15}; z_{16}) = 0.9218$ ;
- Como a inclusão da medida resulta em um aumento significativo do valor do cosseno, superior a um limiar de inclusão,  $\cos\theta_{inc} = 0.01$ , a medida  $z_{16}$  é mantida como suspeita e incluída no grupo de medidas errôneas:  
 $\cos\theta(z_{15}; z_{16}) - \cos\theta(z_{15}) = 0.9218 - 0.7943 = 0.1275 > \cos\theta_{inc} = 0.01$ .

- e) No próximo passo inclui-se a informação subsequente, medida  $z_1$  :
- $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_1) = 0.9257$ , e cujo  $\cos\theta$  é menor que  $\cos\theta_{inc}$  :
  - $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_1) - \cos\theta(z_{15}; z_{16}) = 0.004 < \cos\theta_{inc}$ . Portanto, descarta-se a informação  $z_1$ , ou seja, ela está livre de erros.
- f) Próximo passo, inclui-se a medida  $z_{22}$  subsequente:
- $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_{22}) = 0.9257$ , e
  - $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_{22}) - \cos\theta(z_{15}; z_{16}) = 0.004 < \cos\theta_{inc}$ . Portanto, descarta-se a informação  $z_{22}$ , pois a mesma está livre de erros.
- g) Próximo passo, inclui-se a informação  $z_2$  :
- $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_2) = 0.9257$ , e
  - $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_2) - \cos\theta(z_{15}; z_{16}) = 0.004 < \cos\theta_{inc}$ . Portanto, descarta-se a informação  $z_2$ , pois a mesma está livre de erros.
- h) Próximo passo, inclui-se a informação  $z_{17}$  :
- $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_{17}) = 0.9613$ , e
  - $\cos\theta(z_{15}; z_{16}; z_{17}) - \cos\theta(z_{15}; z_{16}) = 0.04 > \cos\theta_{inc}$ . Portanto, a informação  $z_{17}$  é errônea e permanece no grupo de errôneos.
- i) E assim sucessivamente.

O fim do processo de identificação ocorre quando se satisfaz a condição  $\cos\theta(z_{suspeitos}) > (1 - \varepsilon_{COS})$ . Utilizou-se  $\varepsilon_{COS} = 0.01$ , de modo que o critério de parada será quando  $\cos\theta(z_{suspeitos}) > 0.99$ .

Caso o teste não seja satisfeito ( $\cos\theta(z_{suspeitos}) < (1 - \varepsilon_{COS})$ ), aumenta-se o valor de  $\varepsilon_{COS}$  em 0.01, ou seja, a nova condição passa a ser:  $\cos\theta(z_{suspeitos}) > 0.98$  executando-se todo o processo novamente. Precisa-se utilizar um limite, caso contrário o cosseno pode ficar muito inferior a 1, sugestão  $\varepsilon_{cos} = [0.01, 0.1]$ , ou seja, no máximo  $\cos\theta > 0.90$ .

## 4.5 CONCLUSÕES

A motivação para este desenvolvimento surgiu da inexistência de métodos capazes de identificar de qual tipo de erro está presente entre as informações disponíveis, bem como da pouca atenção até o momento dispensada na ocorrência conjunta de erros de topologia e em medidas.

Este capítulo descreve a metodologia proposta para a análise e determinação da natureza ou tipo do erro detectado, baseado na interpretação dos MLN e dos testes de colinearidade aplicados para este fim. A análise da natureza do erro além de ter permitido o desenvolvimento de um algoritmo para a análise conjunta de erros, possibilita também a utilização de outras metodologias existentes. Pois, na ocorrência de apenas um tipo de erro (topologia ou medida), podem ser também utilizadas as metodologias de identificação de erros de topologia ou de erros grosseiros em medidas já consagradas na literatura.

O algoritmo completo proposto para a análise conjunta de erros de topologia e de erros grosseiros em medidas é apresentado, definindo-se as metodologias utilizadas em cada caso. Utilizaram-se os testes de colinearidade como metodologia principal, tanto para a análise de erros de topologia, quanto para a identificação de erros em medidas visando difundir sua aplicação na IEM e reduzir a distância entre as metodologias já existentes para a identificação de cada tipo de erro separadamente.

Descreve-se ainda um novo algoritmo de identificação de erros em medidas via testes de colinearidade, executado em apenas uma etapa e que se acredita ser um caminho para a futura execução dos testes de colinearidade envolvendo as informações associadas aos disjuntores e às medidas simultaneamente.

## 5 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

### 5.1 INTRODUÇÃO

A simulação de erros de topologia e de erros grosseiros em medidas, indispensáveis à validação do algoritmo desenvolvido foi realizada logo após a etapa de simulação de medidas (inclusão de erros aleatórios aos valores reais das medidas), e anteriormente a composição das matrizes de observação utilizadas na estimação de estados generalizada.

A seguir exibem-se os parâmetros e as condições de simulação, as características dos sistemas teste, os planos de medição considerados, as metodologias de simulação de erros de topologia e de erros em medidas, os tipos de erros aos quais os algoritmos foram submetidos para validação e os procedimentos para correção das informações identificados como errôneas

### 5.2 SISTEMAS TESTE

#### 5.2.1 Sistema Teste IEEE-30 Barras

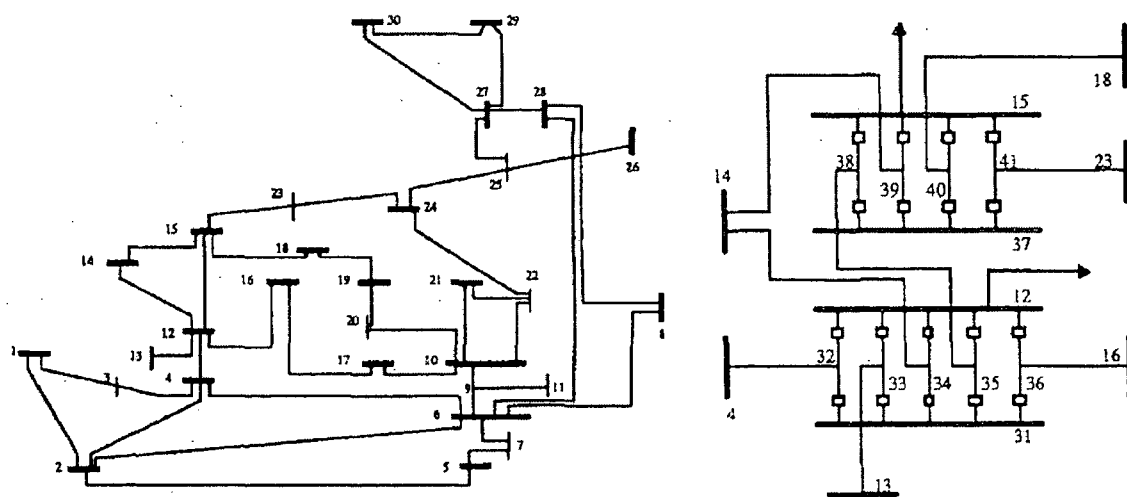


FIGURA 3 - SISTEMA TESTE IEEE-30 BARRAS E MODELAGEM DAS SUBESTAÇÕES 12 E 15 [7].

O diagrama unifilar do sistema teste IEEE 30 barras é apresentado na Figura 3. Considera-se a modelagem dos nós ou subestações 12 e 15 (convencionais) no nível físico.

Os disjuntores foram modelados juntamente com as linhas de transmissão e transformadores, sendo caracterizados pelo valor da reatância. Adotaram-se os valores de reatância iguais a 0.000 para disjuntores fechados e iguais a 9999.0 para disjuntores abertos. Cabe ressaltar que esses valores são apenas simbólicos, para identificação do disjuntor e de seu *status*, pois esses valores não são utilizados na formulação do problema de estimação.

As medidas analógicas convencionais consideradas são as seguintes:

- Medição de injeção de potência em todas as barras convencionais (barras 1 a 30), excetuando-se as barras de injeção nula (barras 31 a 41).
- Medições de fluxo em ambos os sentidos para todas as linhas de transmissão (ramos convencionais).

#### 5.2.1.1 IEEE-30 barras - Condição de operação e plano de medição 1 (IEEE30\_1)

- Disjuntores fechados: ramo chaveável 12-32, 12-33, 12-34, 12-36, 15-39, 15-40 e 15-41;
- Medidas de fluxo em disjuntor: ramo chaveável 12-32, 12-33, 12-36, 15-41, 31-35, 37-39, 37-40;
- Barras de injeção nula: barra 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41;
- Referências angulares: barra 1, 31, 35, 37, 38.

#### 5.2.1.2 IEEE-30 barras - Condição de operação e plano de medição 2 (IEEE30\_2)

- Disjuntores fechados: ramo chaveável 12-32, 12-33, 12-34, 12-35, 12-36, 15-38, 15-39, 37-40 e 37-41;

- Medidas de fluxo em disjuntor: ramo chaveável 12-32, 12-33, 12-36, 15-38, 15-39, 15-40, 15-41, 31-35, 37-38, 37-39, 37-40, 37-41;
- Barras de injeção nula: barra 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41;
- Referências angulares: barra 1, 31, 37.

### 5.2.2 Sub-rede Relevante do Sistema Teste IEEE 30 barras (19 Barras)

De modo a facilitar execução das simulações e considerando-se o conhecimento prévio da zona de anomalia [9], [12] e [36], utilizou-se a sub-rede relevante do sistema teste IEEE 30 barras. Nesse caso, supõe-se 12 e 15 (Figura 3) tenham sido previamente identificadas como as mais prováveis de conterem erros (zona de anomalia). Para tanto, utilizou-se o modelo equivalente da sub-rede relevante conforme descrito em [13] e [11].

A Figura 4 ilustra a sub-rede relevante do sistema teste IEEE 30 barras (19 barras), modelado no nível físico.

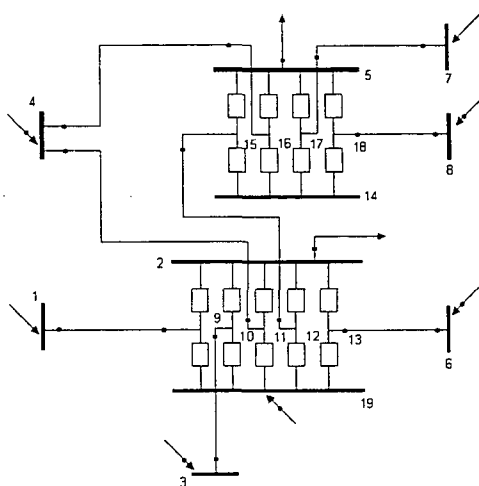


FIGURA 4 - SUB-REDE RELEVANTE DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS)

As medidas analógicas convencionais consideradas são as seguintes:

- Medição de injeção de potência em todas as barras convencionais (barras 1 a 8), excetuando-se as barras de injeção nula (barras 9 a 19).

- Medições de fluxo em todas as linhas de transmissão (ramos convencionais) em ambos os sentidos.

#### 5.2.2.1 Sub-rede relevante do sistema teste IEEE 30 barras - Condição de operação e plano de medição 1 (IEEE19\_1)

- Disjuntores fechados: ramo chaveável 2-9, 2-10, 2-11, 2-13, 5-16, 5-17, 5-18;
- Medidas de fluxo em disjuntor: ramo chaveável 2-9, 2-10, 2-13, 5-18, 19-12, 14-16, 14-17;
- Barras de injeção nula: barra 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19;
- Referências angulares: barra 1, 12, 14, 15, 19.

A Figura 5 ilustra a condição de operação e o plano de medição nos fluxos em disjuntores considerados para a condição 1.

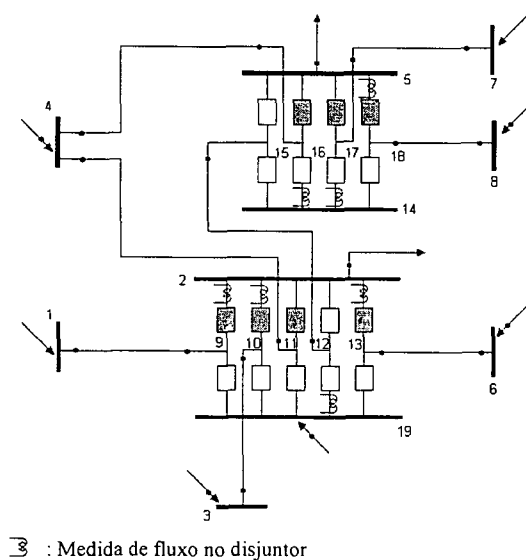


FIGURA 5 - SUB-REDE RELEVANTE DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS) - CONDIÇÃO 1 [13]

#### 5.2.2.2 Sub-rede relevante do sistema teste IEEE 30 barras - Condição de operação e plano de medição 2 (IEEE19\_2)



- Disjuntores fechados: ramo chaveável 2-9, 2-10, 2-11, 2-12, 2-13, 5-15, 5-16, 14-17, 14-18;
- Medidas de fluxo em disjuntor ramo chaveável 2-9, 2-10, 2-13, 5-15, 5-16, 5-17, 5-18, 19-12, 14-15, 14-16, 14-17, 14-18;
- Barras de injeção nula: barra 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19;
- Referências angulares: barra 1, 14, 19.

A Figura 6 ilustra a condição de operação e o plano de medição nos fluxos em disjuntores considerados para a condição 2.

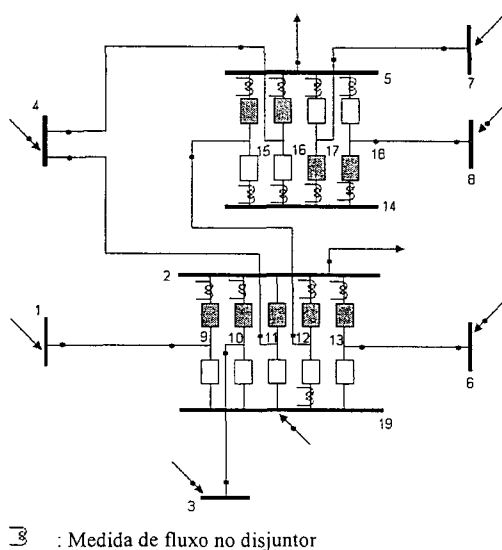


FIGURA 6 - SUB-REDE RELEVANTE DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS (19 BARRAS) - CONDIÇÃO 2 [13]

A Tabela 4 apresenta a correlação existente entre os disjuntores modelados para o sistema completo de 30 barras e para a sua sub-rede relevante.

TABELA 4 - CORRELAÇÃO DISJUNTORES - MODELOS COMPLETO E SUB-REDE RELEVANTE

Disjuntor	<i>status</i>		Ramos Chaveáveis	
	Condição 1	Condição 2	Sub-rede relevante (IEEE-19)	IEEE-30
1	1	1	2-9	12-32
2	1	1	2-10	12-33
3	1	1	2-11	12-34
4	0	1	2-12	12-35
5	1	1	2-13	12-36
6	0	1	5-15	15-38
7	1	1	5-16	15-39
8	1	0	5-17	15-40
9	1	0	5-18	15-41
10	1	0	19-9	31-32
11	0	0	19-10	31-33
12	0	0	19-11	31-34
13	0	0	19-12	31-35
14	0	0	19-13	31-36
15	0	0	14-15	37-38
16	0	0	14-16	37-39
17	0	1	14-17	37-40
18	0	1	14-18	37-41

### 5.3 SIMULAÇÃO DE MEDIDAS

O vetor de medidas reais ( $z_0$ ) compreende o conjunto de todas as medidas contidas no plano de medição de cada sistema teste. Dessa forma, o vetor  $z_0$  é composto encadeando-se as medidas constantes no plano de medição do seguinte modo:

$$z_0 = [\text{fluxos ramos convencionais} | \text{fluxos ramos chaveáveis} | \text{injeção de potência}]. \quad (5.1)$$

Os testes realizados utilizaram os valores simulados das medidas e não o valor real proveniente do programa de fluxo de potência no nível de subestação (possibilita a obtenção dos valores das medidas de fluxo nos disjuntores), de forma a submeter os métodos analisados às condições mais próximas das encontradas em sistemas reais. Para tanto, utilizou-se um simulador de medidas com a finalidade de implementar um erro aleatório em cada medida, considerando-se a exatidão dos instrumentos de medição.

Os valores das medidas reais (valor verdadeira mais erro aleatório) servem como referência. A determinação dos valores das grandezas na operação em tempo

real é efetuada por meio das leituras realizadas por transdutores digitais de grandezas, cujos valores apresentam erros intrínsecos (sistemáticos e aleatórios). Dessa forma, reportam-se ao estimador as medidas equivalentes aos valores obtidos por meio dos instrumentos de medição.

Em suma, de forma a aproximar a estimação de estados utilizada em um sistema real, a cada medida ( $z_0$ ), introduziram-se erros aleatórios.

Dessa forma, obtém-se o vetor de valores medidos ( $z$ ):

$$z = z_0 + \varepsilon_m \quad (5.2)$$

## 5.4 SIMULAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA

O método utilizado para simulação de erros de topologia baseou-se em reportar ao estimador de estados a condição incorreta do *status* do disjuntor que se deseja simular como errôneo. Desse modo, caso deseje-se simular um disjuntor como errôneo, cujo *status* real é fechado, reportar-se-á o *status* aberto (condição errada) ao estimador de estado, e vice-versa.

Utilizou-se a seguinte nomenclatura para as condições dos *status* de disjuntores e chaves:

- *status* = 0 - dispositivo (disjuntor/chave) aberto;
- *status* = 1 - dispositivo (disjuntor/chave) fechado.

### 5.4.1 Erro Simples

O erro simples ocorre quando reporta-se ao estimador de estados o *status* incorreto de apenas um único disjuntor. Os disjuntores que estavam fechados (*status* 1) são reportados como abertos (*status* 0) ao estimador, e vice-versa.

### 5.4.2 Erro de Inclusão

Este tipo de erro refere-se à inclusão de um ramo que não está em operação, e

é inadvertidamente incluído no modelo da rede.

O erro de inclusão simulado diz respeito à linha 12-15 do sistema original. Este erro é obtido a partir da modelagem errônea dos disjuntores 4 e 6 para a condição 1 (seção 5.2.1.1), mudando-se os respectivos *status* de 0 para 1. Estes disjuntores estão conectados respectivamente aos ramos chaveáveis:

- a) 2-12 e 5-15 (IEEE19\_1);
- b) 12-35 e 15-38 (IEEE30\_1).

#### 5.4.3 Erro de Exclusão

O erro de exclusão é aplicado a uma linha de transmissão conectada entre dois disjuntores fechados, os quais são considerados abertos pelo estimador. Assim, exclui-se indevidamente o ramo em questão do modelo da rede reportado ao estimador, cuja condição real é de operação.

O erro de inclusão simulado diz respeito à linha 12-15 do sistema original. Este erro é obtido a partir da modelagem errônea dos disjuntores 4 e 6 para a condição 2 (seção 5.2.1.1), mudando-se os respectivos *status* de 1 para 0. Estes disjuntores estão conectados respectivamente aos ramos chaveáveis:

- a) 2-12 e 5-15 (IEEE19\_2);
- b) 12-35 e 15-38 (IEEE30\_2).

#### 5.4.4 Erro de Seccionamento de Barra (*Bus Split*)

A condição de operação 2 (Figura 6) implica em um seccionamento de barra na subestação modelada para o ramo 12 (IEEE30\_2) ou 2 (IEEE19\_2).

Neste erro, um seccionamento da subestação 15 é ignorado no modelo da rede, o qual supõe que os disjuntores 8, 9, 17 e 18 estão erroneamente modelados:

- a) Sistema IEEE19\_2:
  - Ramo chaveável 5-17 e 5-18 - mudança do *status* 0 para 1;
  - Ramo chaveável 14-17 e 14-18 - mudança do *status* 1 para 0;

b) Sistema IEEE30\_2:

- Ramo chaveável 15-40 e 15-41 - mudança do *status* 0 para 1;
- Ramo chaveável 37-40 e 37-41 - mudança do *status* 1 para 0.

#### 5.4.5 Correção dos *status* Identificados como Errôneos

Realizou-se a correção dos *status* identificados como errôneos alterando-se o valor do respectivo *status*, de 1 para 0 ou de 0 para 1, conforme o caso.

### 5.5 SIMULAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS

Do mesmo modo que a simulação de erros de topologia, erros grosseiros em medidas foram simulados e posteriormente reportados ao estimador de estados.

Para simular-se um erro de medida, utilizou-se como base o valor medido da grandeza ( $z$ ). À posição correspondente a medida  $z^n$  no vetor  $z$ , insere-se o valor errado em cuja presença pretende-se verificar o comportamento dos métodos de identificação descritos no Capítulo 4.

#### 5.5.1 Erro Simples

Nesta situação aplica-se o erro grosseiro a uma única medida. O APÊNDICE A apresenta todas as medidas presentes nos sistemas, submetidos à identificação de erros simples.

#### 5.5.2 Erros Múltiplos

Nesta simulação implementam-se erros grosseiros simultaneamente em diversas medidas.

Inicialmente pretendia-se reproduzir os erros realizados em [21] e [19], porém, os casos aqui simulados não representam fielmente as características e condições indicadas nas referências devido a estar-se utilizando aqui o modelo linearizado,

diferentemente das referências que utilizam o modelo AC. Seleccionaram-se as medidas em cada caso simulado de forma a aproximar-se ao máximo às condições e características descritas nas referências.

Os erros múltiplos dividem-se em três casos distintos [19]:

- a) Erros em informações relacionadas: introdução de erros referentes ou adjacentes a uma mesma barra.
- b) Erros em informações não relacionadas: introdução de erros em medidas que não interagem diretamente entre si.
- c) Erros não identificáveis: erro em uma medida redundante apenas com uma única outra informação, ou seja, erro em medidas pertencentes a um mesmo conjunto crítico.

Uma situação especial de erro múltiplo relacionado é a simulação de falha em uma UTR, descrito na próxima seção.

As Tabelas 5 e 6 a seguir apresentam todos os casos e sistemas utilizados na simulação de erros múltiplos em medidas.

TABELA 5 - CASOS DE ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS SIMULADOS (SISTEMA IEEE19 BARRAS - SUB-REDE RELEVANTE DO IEEE 30 BARRAS)

Caso Simulado: Erros Múltiplos Relacionados									
Sistema IEEE19_1					Sistema IEEE19_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
15	t dj	2-9	-0,275	-0,330	17	t dj	2-9	-0,160	0
16	t dj	2-10	-0,170	-0,204	18	t dj	2-10	-0,170	0
17	t dj	2-13	0,070	0,084	19	t dj	2-13	0,070	0
23	p	2	-0,120	-0,144	30	p	2	-0,120	0
Caso Simulado: Erros Múltiplos Não Relacionados									
Sistema IEEE19_1					Sistema IEEE19_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
1	t	1-9	0,275	1,100	1	t	1-9	0,160	0,640
5	t	4-11	-0,255	-1,020	5	t	4-11	-0,061	-0,245
15	t dj	2-9	-0,275	-1,100	8	t	13-6	0,070	0,280
18	t dj	5-18	0,055	0,220	15	t	12-15	0,079	0,315
24	p	3	0,170	0,680	29	p	1	0,160	0,640
27	p	6	-0,070	-0,280	31	p	3	0,170	0,680
28	p	7	-0,060	-0,240	35	p	7	-0,060	-0,240
29	p	8	-0,055	-0,220	36	p	8	-0,055	-0,220
Caso Simulado: Erro Não Identificável									
Sistema IEEE19_1					Sistema IEEE19_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
5	t	4-11	-0,255	-1,020	5	t	4-11	-0,061	-0,245
Caso Simulado: Presença de 4 Erros Relacionados e 4 Erros Não Relacionados [18]									
Sistema IEEE19_1					Sistema IEEE19_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
1	t	Info.	0,275	0,000	1	t	1-9	0,16	0,360
5	t	4-11	-0,255	-1,020	5	t	4-11	-0,06	-0,245
15	t dj	2-9	-0,275	-1,100	15	t	12-15	0,08	0,315
17	t dj	2-13	0,070	0,280	17	t dj	2-9	-0,16	-0,640
22	p	1	0,275	0,000	29	p	1	0,16	0,640
23	p	2	-0,120	-0,480	31	p	3	0,17	0,680
26	p	5	-0,080	-0,320	35	p	7	-0,06	-0,240
29	p	8	-0,055	-0,220	36	p	8	-0,06	-0,220

LEGENDA: *t* (medida de fluxo em linha de transmissão), *t dj* (medida de fluxo em disjuntor) e *p* (medida de injeção de potência).

TABELA 6 - CASOS DE ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS SIMULADOS (SISTEMA IEEE30 BARRAS)

Caso Simulado: Erros Múltiplos Relacionados									
Sistema IEEE30_1					Sistema IEEE30_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
1	t	1-2	1,613	0	1	t	1-2	1,206	0
5	t	2-4	0,420	0	5	t	2-4	0,285	0
11	t	3-4	0,797	0	11	t	3-4	0,566	0
21	t	6-8	0,299	0	21	t	6-8	0,274	0
88	p	1	2,434	0	95	p	1	1,796	0
89	p	2	0,183	0	96	p	2	0,183	0
90	p	3	-0,024	0	97	p	3	-0,024	0
91	p	4	-0,076	0	98	p	4	-0,076	0

Caso Simulado: Erros Múltiplos Não Relacionados									
Sistema IEEE30_1					Sistema IEEE30_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
7	t	2-5	0,782	1,759	7	t	1-5	0,698	1,571
40	t	21-10	-0,169	-0,674	29	t	8-28	-0,026	-0,104
47	t	14-34	-0,165	-0,661	50	t	17-16	0,047	0,189
50	t	17-16	-0,064	-0,257	67	t	24-25	0,086	0,342
67	t	24-25	-0,038	-0,153	81	t	38-35	-0,091	-0,363
94	p	7	-0,228	-0,912	101	p	7	-0,228	-0,912
108	p	21	-0,175	-0,700	115	p	21	-0,175	-0,700
116	p	29	-0,024	-0,096	123	p	29	-0,024	-0,096

Caso Simulado: Erro Não Identificável									
Sistema IEEE30_1					Sistema IEEE30_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
37	t	10-20	0,132	0,526	37	t	10-20	-0,175	-0,698

Caso Simulado: Presença de 4 Erros Relacionados e 4 Erros Não Relacionados [18]									
Sistema IEEE30_1					Sistema IEEE30_2				
N.º	Informação		Valor [pu]		N.º	Informação		Valor [pu]	
	Tipo	Ramo barra	real	simul.		Tipo	Ramo barra	real	simul.
1	t	1-2	1,613	3,630	1	t	1-2	1,206	2,714
5	t	2-4	0,420	1,682	5	t	2-4	0,285	1,141
31	t	9-10	0,297	1,189	29	t	8-28	-0,026	-0,104
67	t	24-25	-0,038	-0,153	67	t	24-25	0,086	0,342
88	p	1	2,434	9,736	95	p	1	1,796	7,183
89	p	2	0,183	0,732	96	p	2	0,183	0,732
94	p	7	-0,228	-0,912	101	p	7	-0,228	-0,912
116	p	29	-0,024	-0,096	123	p	29	-0,024	-0,096

LEGENDA: *t* (medida de fluxo em linha de transmissão), *t dj* (medida de fluxo em disjuntor) e *p* (medida de injeção de potência).



### 5.5.3 Falha em Unidade Terminal Remota (UTR)

Este tipo de teste é apresentado em [21] e simula a ocorrência de falha em uma unidade terminal remota responsável pelo envio das informações referentes a um nó elétrico, ao configurador de redes da ONS.

Simulou-se a falha em UTR pela perda de todas as medidas de fluxo relacionadas a uma barra pré-selecionada e da medida de injeção desta mesma barra. Considerou-se e aplicou-se este teste para cada uma das barras convencionais do sistema simulado.

### 5.5.4 Desativação das Medidas Identificadas como Errôneas

Por simplicidade, não se utilizou nenhum método de recuperação das medidas corrompidas por erros ou de implementação de pseudo-medidas para verificar-se o comportamento dos testes de colinearidade na IEM. No entanto, qualquer método apresentado na literatura [18], [19], pode ser utilizado uma vez que a medida errônea é identificada no processo proposto.

Assim, elaborou-se um método para eliminar a influência das medidas identificadas como errôneas, sem que haja necessidade de correção das mesmas e permitindo que o estimador não apresente como suspeito em uma nova estimação ou reestimação as informações errôneas já identificadas.

O método desenvolvido consiste em desativar as medidas flagradas e identificadas como erradas pela alteração do valor atual da covariância destas medidas por um valor muito maior que covariância real da medida, por exemplo,  $R_{med\_err} = 10000$  ao invés de 0.001. Assim, indica-se ao estimador que esta informação não é confiável e evitam-se problemas de criticidade e observabilidade, uma vez que na literatura é usual a exclusão da medida errônea do plano de medição.

## 5.6 CONCLUSÕES

O objetivo deste capítulo é descrever todas as condições e características utilizadas nas simulações deste trabalho, de modo a permitir a reprodução de todos os testes realizados. Dessa forma, descrevem-se os parâmetros e as condições de simulação, as características dos sistemas teste, os planos de medição considerados, as metodologias de simulação de erros de topologia e de erros em medidas, os tipos de erros aos quais os algoritmos foram submetidos para validação e os procedimentos para correção das informações identificados como errôneas.

## 6 RESULTADOS

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nas simulações.

Primeiramente, demonstra-se a compilação dos resultados referentes à natureza dos erros detectados diante das diversas condições simuladas.

Logo após apresentam-se os resultados do algoritmo de identificação de na presença de um único tipo de erro, de topologia ou em medida, separadamente.

Os resultados subseqüentes demonstram o comportamento e a eficácia da proposta apresentada para detecção e identificação conjunta de erros de topologia e de erros grosseiros em medidas.

### 6.1 NATUREZA DOS ERROS DETECTADOS

Os resultados pertinentes à verificação da natureza do erro são aqueles que representam as seguintes condições: erros somente de topologia, erros somente em medidas, e erros simultâneos de topologia e em medidas, conforme as Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.

Cada linha das tabelas representa uma condição simulada individualmente. A primeira e a segunda coluna das Tabelas 7 e 8, informam detalhes sobre a condição de erro simulada. A terceira e a quarta coluna mostram os maiores MLN associados às medidas e às restrições operacionais, respectivamente. Os resultados mais importantes, referente aos valores do cosseno associado às medidas e às restrições operacionais são apresentados nas duas últimas colunas das tabelas.

Na Tabela 7, observa-se e comprova-se que o valor do  $\cos\theta_o$  é sempre próximo a 1 na presença apenas de erros de topologia. Observa-se ainda que existem tanto restrições operacionais (disjuntores) quanto medidas suspeitas ( $|\lambda^N| > \lambda_t$ ) entre os suspeitos, indicando a propagação dos erros de topologia sobre as medidas analógicas. Ou seja, a ocorrência de apenas um erro simples de topologia, resulta em um conjunto de suspeitos contendo tanto restrições operacionais (englobando a informação com

erro) quanto um número significativo de medidas livres de erro.

TABELA 7 - VERIFICAÇÃO DA NATUREZA DO ERRO NA PRESENÇA DE ERROS DE TOPOLOGIA

ERRO SIMULADO (IEEE19_1)		COMPORTAMENTO AVALIADO			
TIPO	DESCRIÇÃO	$ \lambda_{o\_max}^N $	$ \lambda_{m\_max}^N $	$\cos \theta_o$	$\cos \theta_m$
Simples	Disjuntor 1	567,3580	266,2961	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 2	357,3550	168,2886	<b>1,0000</b>	0,5819
Simples	Disjuntor 3	452,5050	247,8860	<b>1,0000</b>	0,8380
Simples	Disjuntor 4	567,1773	266,3713	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 5	147,9185	69,8852	<b>1,0000</b>	0,5801
Simples	Disjuntor 6	684,1643	307,8474	<b>1,0000</b>	0,7185
Simples	Disjuntor 7	353,7059	192,4433	<b>1,0000</b>	0,8395
Simples	Disjuntor 8	113,3176	60,26842	<b>1,0000</b>	0,6682
Simples	Disjuntor 9	117,5948	55,1126	<b>1,0000</b>	0,5877
Simples	Disjuntor 10	566,6566	265,9156	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 11	566,6054	265,5666	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 12	566,0772	265,6375	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 13	566,0772	265,6375	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 14	567,2589	266,4754	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 15	569,4707	267,9550	<b>1,0000</b>	0,5853
Simples	Disjuntor 16	683,7069	307,3228	<b>1,0000</b>	0,7185
Simples	Disjuntor 17	684,5414	308,4920	<b>1,0000</b>	0,7185
Simples	Disjuntor 18	685,5176	309,0062	<b>1,0000</b>	0,7185
Múltiplos	Inclusão	684,6996	308,169	<b>1,0000</b>	0,6229
Múltiplos	Exclusão	684,5003	309,0039	<b>1,0000</b>	0,7232
Múltiplos	Bus Split	683,8972	308,9214	<b>1,0000</b>	0,8741

A Tabela 8 mostra os resultados quando apenas erros em medidas estão presentes. As duas últimas colunas da tabela mostram os resultados do teste de colinearidade aplicado às medidas e às restrições operacionais em cada caso simulado. Nos primeiros dez casos apresentados (linhas três à doze), observa-se e comprova-se que o valor do  $\cos \theta_m$  é sempre próximo a 1 na presença apenas de erros em medidas e que o valor do  $\cos \theta_o$  é significativamente diferente de 1. Observando-se os resultados da terceira coluna da tabela, verifica-se que não existem restrições operacionais suspeitas, ou seja, o maior MLN associado às restrições operacionais ( $|\lambda_{o\_max}^N|$ ) é inferior ao limite de detecção de erro ( $\lambda_t$ ) em todos os casos simulados.

As três últimas linhas da Tabela 8 (linhas treze à quinze) apresentam condições nas quais são simulados erros em medidas de fluxo em disjuntores. Nestes casos, nos quais se simulam erros grosseiros em medidas de fluxo em disjuntor ( $z_{15}$  e  $z_{18}$  e múltiplos relacionados), a condição  $\cos \theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos}$  é satisfeita, levando a uma interpretação errônea da presença de erros de topologia.

TABELA 8 - VERIFICAÇÃO DA NATUREZA DO ERRO NA PRESENÇA DE ERROS EM MEDIDAS

ERRO SIMULADO (IEEE19_1)		COMPORTAMENTO AVALIADO			
TIPO	DESCRIÇÃO	$ \lambda_{o\_max}^N $	$ \lambda_{m\_max}^N $	$\cos \theta_o$	$\cos \theta_m$
Simples	$z_1(t)$	<b>0,4398</b>	233,9267	0,286315	<b>1,000</b>
Simples	$z_2(t)$	<b>0,4393</b>	234,0895	0,291248	<b>1,000</b>
Simples	$z_{22}(p)$	<b>0,4413</b>	234,5945	0,284038	<b>1,000</b>
Simples	$z_{23}(p)$	<b>0,5041</b>	80,9743	0,330265	<b>1,000</b>
Simples	$z_{26}(p)$	<b>0,4888</b>	58,0651	0,202096	<b>1,000</b>
Simples	$z_{27}(p)$	<b>0,4983</b>	62,4269	0,294782	<b>1,000</b>
Múltiplos	Ñ relacionados	<b>1,1138</b>	523,3488	0,452846	<b>1,000</b>
Múltiplos	Não ident.	<b>0,6251</b>	481,3540	0,0718	<b>1,000</b>
Múltiplos	Rel. e ñ rel.	<b>1,5327</b>	741,3116	0,685663	<b>1,000</b>
Múltiplos	UTR barra 5	<b>0,4998</b>	44,5313	0,492509	<b>1,000</b>
Simples	$z_{15}(t\ dj)$	<b>0,4397</b>	234,2867	<b>0,99994</b>	<b>1,000</b>
Simples	$z_{18}(t\ dj)$	<b>0,4965</b>	48,94381	<b>0,99831</b>	<b>1,000</b>
Múltiplos	Relacionados	<b>0,5092</b>	43,7938	<b>0,963825</b>	<b>1,000</b>

LEGENDA:  $t$  (medida de fluxo em linha de transmissão),  $t\ dj$  (medida de fluxo em disjuntor) e  $p$  (medida de injeção de potência).

A primeira e a segunda coluna da Tabelas 9 informam detalhes sobre o erro de topologia simulado, bem como a terceira e quarta colunas informam detalhes da condição de erros em medidas analógicas simulada. A quinta e a sexta coluna mostram os maiores MLN associados às medidas e às restrições operacionais, respectivamente. Os resultados mais importantes, referente aos valores do cosseno associado às medidas e às restrições operacionais são apresentados nas duas últimas colunas das tabelas. À exceção da última linha da tabela, observa-se e verifica-se que os valores do  $\cos \theta_m$  e do  $\cos \theta_o$  são significativamente diferentes de 1, indicando a presença de erros conjuntos de topologia e em medidas. Não se observou nenhum comportamento definido para o valor do  $\cos \theta_m$ . Além disso, quando se simulam erros grosseiros em medidas de fluxo em disjuntor (múltiplos relacionados), condição apresentada na última linha da tabela, a condição  $\cos \theta_o > 1 - \varepsilon_{\cos}$  é satisfeita, levando a uma interpretação errônea da presença de erros de topologia.

TABELA 9 - VERIFICAÇÃO DA NATUREZA DO ERRO NA PRESENÇA DE ERROS DE TOPOLOGIA E EM MEDIDAS

ERRO SIMULADO (IEEE19_1)				COMPORTAMENTO AVALIADO			
TOPOLOGIA		MEDIDAS					
TIPO	DESCRIÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO	$ \lambda_{o\_max}^N $	$ \lambda_{m\_max}^N $	$\cos \theta_o$	$\cos \theta_m$
Simple	Disjuntor 1	Simple	$z_1(t)$	441,4914	265,4989	0,8836	0,6624
Simple	Disjuntor 1	Simple	$z_2(t)$	442,6596	266,0021	0,8836	0,6624
Simple	Disjuntor 3	Múltiplos	Ñ relacionados	1004,2950	989,4342	0,6660	0,9226
Simple	Disjuntor 3	Múltiplos	Não ident.	543,1837	498,7213	0,7472	0,9402
Simple	Disjuntor 3	Múltiplos	Rel. e ñ rel.	775,6614	988,5931	0,5545	1,000
Simple	Disjuntor 1	Múltiplos	UTR barra 1	317,8474	265,1609	0,7495	0,7810
Simple	Disjuntor 5	Múltiplos	UTR barra 5	151,5787	71,2837	0,8776	0,5769
Simple	Disjuntor 8	Múltiplos	UTR barra 8	122,1632	67,8613	0,9032	0,7277
Simple	Disjuntor 3	Múltiplos	Relacionados	450,6309	247,0245	<b>0.9924</b>	0.8394

## 6.2 RESULTADOS DOS MÉTODOS PROPOSTOS APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA

### 6.2.1 Teste de Colinearidade para IET

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados do teste de colinearidade na IET para os sistemas IEEE 30 barras, modelos completo e sub-rede relevante, respectivamente. Cada linha das tabelas representa uma condição simulada individualmente. A primeira e a segunda coluna das tabelas informam detalhes sobre a condição de erro simulada. As cinco colunas seguintes (coluna três a sete) apresentam os resultados obtidos para a sub-rede relevante do sistema IEEE 30 barras na condição de operação 1 e as cinco últimas colunas (coluna oito a doze) apresentam os resultados obtidos para o mesmo sistema na condição de operação 2, conforme indicado no Capítulo 5. As colunas três e oito apresentam se todos os erros foram corretamente identificados, as colunas quatro e nove indicam o número de medidas suspeitas, as colunas cinco e dez indicam o número de medidas suspeitas como resultado da primeira etapa do teste de colinearidade aplicado a identificação de erros em cada caso simulado, as colunas seis e onze indicam se há informações pertencentes a conjuntos críticos entre os suspeitos e as colunas sete e doze apresentam o número de reestimações necessárias à correta identificação de todos os erros presentes para cada

caso simulado.

Na Tabela 10, quando se simulam erros simples (linha três a vinte) observa-se a correta identificação da maioria dos casos simulados. Dentre estes resultados, aqueles que constam como NÃO identificados (colunas 3 e 8) representam erros não detectáveis, pois o fluxo nestes disjuntores, tanto na condição aberta quanto fechada é aproximadamente igual a zero. Para as condições de erros múltiplos de exclusão e de *Bus split*, alguns disjuntores com erro de modelagem não foram corretamente identificados devido a problemas de criticidade, redundância e degradação da base de dados. Também nestes casos observou-se a necessidade de reestimações para a correta identificação de erros.

TABELA 10 - RESULTADO DO TESTE DE COLINEARIDADE - ERROS DE TOPOLOGIA (IEEE19 BARRAS)

ERRO SIMULADO		SISTEMA IEEE19_1					SISTEMA IEEE19_2							
TIPO	DISJ.	ERRO IDENT.	Nº SUSPEITOS		CJ. CRÍT. SUSP.	Nº RE-EST.	ERRO IDENT.	Nº SUSPEITOS		CJ. CRÍT. SUSP.	Nº RE-EST.			
			$ \lambda_o^N  > \lambda_i$	1ª ETAPA T. COS.				$ \lambda_o^N  > \lambda_i$	1ª ETAPA T. Cos.					
Simple	1	SIM	3	3	NÃO	0	SIM	9	6	NÃO	0			
Simple	2	SIM	3	3	NÃO	0	SIM	9	6	NÃO	0			
Simple	3	SIM	2	2	NÃO	0	SIM	3	3	NÃO	0			
Simple	4	SIM	4	4	SIM	0	SIM	5	5	NÃO	0			
Simple	5	SIM	2	2	NÃO	0	SIM	9	6	NÃO	0			
Simple	6	SIM	4	4	NÃO	0	SIM	5	5	NÃO	0			
Simple	7	SIM	5	5	NÃO	0	NÃO <sup>(*)</sup>	-	-	-	-			
Simple	8	SIM	4	4	NÃO	0	SIM	10	6	SIM	0			
Simple	9	SIM	5	5	NÃO	0	SIM	10	6	SIM	0			
Simple	10	SIM	4	4	SIM	0	SIM	13	10	NÃO	0			
Simple	11	SIM	5	4	SIM	0	SIM	14	9	SIM	0			
Simple	12	SIM	6	5	SIM	0	SIM	13	10	SIM	0			
Simple	13	NÃO <sup>(*)</sup>	0	0	-	0	SIM	13	10	NÃO	0			
Simple	14	SIM	5	3	SIM	0	SIM	15	9	SIM	0			
Simple	15	NÃO <sup>(*)</sup>	0	0	-	0	SIM	9	6	SIM	0			
Simple	16	SIM	4	2	SIM	0	SIM	9	6	SIM	0			
Simple	17	SIM	6	2	SIM	0	SIM	2	2	NÃO	0			
Simple	18	SIM	7	3	SIM	0	SIM	2	2	NÃO	0			
Inclusão	4	SIM	6	3	SIM	1	-							
	6	SIM												
Exclusão	4	-					SIM	2	18	NÃO	1			
	6						NÃO	3	18	SIM				
Bus Split	8	-					NÃO	7	4	SIM	2			
	9						NÃO							
	17						SIM							
	18						SIM							

(\*) Erro não detectável, pois o fluxo neste disjuntor, tanto na condição aberta quanto fechada é aproximadamente igual a zero.

Uma observação relevante diz respeito à impossibilidade de identificação de erros em informações críticas. A análise de criticidade realizada para configuração verdadeira dos disjuntores pode apontar algumas restrições operacionais de disjuntores como críticas. Entretanto, quando se reporta o *status* desta restrição crítica erroneamente ao estimador, o resultado de uma nova análise de criticidade pode indicar que para esta nova situação a restrição deste mesmo disjuntor deixa de ser crítica, podendo então ser identificado. Por exemplo, apesar da análise de criticidade para a configuração verdadeira indicar os disjuntores 1, 2 e 3 (Tabela 10) como restrições críticas (Sistema IEEE19\_1), quando informa-se ao estimador o *status* errado nestes disjuntores, os mesmos deixam de ser críticos e podem ser identificados.

Assim como os resultados apresentados na Tabela 10, na tabela 11, quando se simulam erros simples (linha três a vinte) observa-se a correta identificação da maioria dos casos simulados, à exceção daqueles que constam como NÃO identificados (colunas 3 e 8) e que representam erros não detectáveis, pois o fluxo nestes disjuntores, tanto na condição aberta quanto fechada é aproximadamente igual a zero. Para as condições de erros múltiplos, apenas um disjuntor na condição de erro de exclusão não foi corretamente identificado devido a problemas de criticidade.

Comparando-se os resultados obtidos para o modelo completo (Tabela 11) e para a sub-rede relevante (Tabela 10) observa-se a eficiência e a correta identificação de erros por meio dos testes de colinearidade. A diferença notória entre estas duas condições avaliadas é a existência de um maior número de informações críticas para o sistema reduzido, como pode ser constatado analisando-se as colunas seis e onze das Tabelas 10 e 11.



TABELA 11 - RESULTADO DO TESTE DE COLINEARIDADE - ERROS DE TOPOLOGIA (IEEE30 BARRAS)

ERRO SIMULADO		SISTEMA IEEE30_1					SISTEMA IEEE30_2				
TIPO	DISJ.	ERRO IDENT.	Nº SUSPEITOS		CJ. CRÍT. SUSP.	Nº RE-EST.	ERRO IDENT.	Nº SUSPEITOS		CJ. CRÍT. SUSP.	Nº RE-EST.
			$ \lambda_o^N  > \lambda_t$	1ª ETAPA T. COS.				$ \lambda_o^N  > \lambda_t$	1ª ETAPA T. Cos.		
Simples	1	SIM	6	6	NÃO	0	SIM	9	9	NÃO	0
Simples	2	NÃO (*)	-	-	-	-	NÃO (*)	-	-	-	-
Simples	3	SIM	3	3	NÃO	0	SIM	3	3	NÃO	0
Simples	4	SIM	7	7	NÃO	0	SIM	5	5	NÃO	0
Simples	5	SIM	1	1	NÃO	0	SIM	1	1	NÃO	0
Simples	6	NÃO (*)	-	-	-	-	SIM	5	5	NÃO	0
Simples	7	SIM	3	3	NÃO	0	SIM	5	5	NÃO	0
Simples	8	SIM	3	3	NÃO	0	SIM	12	12	NÃO	0
Simples	9	SIM	2	2	NÃO	0	SIM	12	12	NÃO	0
Simples	10	SIM	10	10	NÃO	0	SIM	17	17	NÃO	0
Simples	11	SIM	11	11	NÃO	0	SIM	18	18	NÃO	0
Simples	12	SIM	10	10	NÃO	0	SIM	11	16	NÃO	0
Simples	13	NÃO (*)	-	-	-	-	SIM	16	16	NÃO	0
Simples	14	SIM	10	10	NÃO	0	SIM	17	17	NÃO	0
Simples	15	NÃO (*)	-	-	-	-	SIM	12	12	NÃO	0
Simples	16	SIM	10	10	NÃO	0	SIM	12	12	NÃO	0
Simples	17	SIM	10	10	NÃO	0	SIM	16	16	NÃO	0
Simples	18	SIM	8	7	NÃO	0	SIM	3	17	NÃO	0
Inclusão	4	SIM	10	10	NÃO	0	-				
	6	SIM									
Exclusão	4						NÃO (**)	16	16	NÃO	0
	6						SIM	2	2		
	8						-				
Bus Split	9										
	17										
	18										
							SIM	12	10	NÃO	0

(\*) Erro não detectável, pois o fluxo neste disjuntor, tanto na condição aberta quanto fechada é aproximadamente igual a zero.

(\*\*) Condição severa de identificação devido a problemas de criticidade.

### 6.2.2 Comportamento dos métodos de IET diante de Erros em Medidas

Os resultados dos testes de colinearidade quando da simulação de um único erro de topologia em conjunto com erros em medidas (simples ou múltiplos) que não estejam relacionadas diretamente a este disjuntor, ou que não sejam suficientes para diminuir a redundância acerca da restrição errônea não se alteraram.

Entretanto quando se simulam erros múltiplos de topologia ou em simultaneidade com erros grosseiros em medidas, a confiabilidade do plano de medição é reduzida significativamente e o processo de IET fica comprometido.

### 6.3 RESULTADOS DOS MÉTODOS PROPOSTOS APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS

Verificou-se o comportamento do teste de colinearidade [17], [30] aplicado diretamente para a IEM (seção 3.5), bem como do teste de colinearidade modificado (seção 4.4).

As Tabelas 12 e 13 apresentam os casos simulados e os resultados do teste de colinearidade aplicado na IEM, na presença de erros simples e múltiplos, respectivamente. Cada linha das tabelas representa uma condição simulada individualmente. As seis primeiras colunas das Tabelas 11 e 12 informam detalhes sobre a condição de erro simulada: erro simples ou múltiplo, número, tipo (injeção, fluxo ou fluxo em disjuntor), ramo ou barra a que se refere à informação, o valor real da medida e o valor errôneo simulado. A coluna sete apresenta se todos os erros foram corretamente identificados, a coluna oito indica o número de medidas suspeitas, a coluna nove indica o número de medidas suspeitas como resultado da primeira etapa do teste de colinearidade aplicado a identificação de erros em cada caso simulado. A coluna dez apresenta o número de reestimações necessárias à correta identificação de todos os erros presentes para cada caso simulado utilizando os testes de colinearidade conforme proposto em [17] e a coluna onze apresenta o número de reestimações utilizando o teste de colinearidade modificado – encadeado (Seção 4.4).

Os resultados apresentados nas Tabela 12 e 13 (coluna sete), demonstram a correta identificação de todos os erros simulados em cada um dos casos (simples ou múltiplos) simulados, conforme mostram as indicações “SIM” na coluna sete das respectivas tabelas.

TABELA 12 - RESULTADO TESTE DE COLINEARIDADE - ERROS SIMPLES EM MEDIDAS

(IEEE-19\_1)

ERRO SIMULADO						COMPORTAMENTO AVALIADO				T. Cos. Modif.
TIPO	INFORMAÇÃO			VALOR [pu]		ERRO IDENT.	Número de Suspeitos		Nº RE- ESTIMA.	Nº RE- ESTIMA.
	Nº.	TIPO	RAMO ou BARRA	REAL	SIMUL.		$ \lambda_m^N  > \lambda_t$	1ª ETAPA T. Cos.		
Simples	1	t	1-9	0,2750	0	SIM	19	19	0	0
Simples	2	t	9-1	-0,2750	0	SIM	19	19	0	0
Simples	3	t	3-10	0,1700	0	SIM	16	16	0	0
Simples	4	t	10-3	-0,1700	0	SIM	16	16	0	0
Simples	5	t	4-11	-0,2550	0	SIM	26	26	0	0
Simples	6	t	11-4	0,2550	0	SIM	26	26	0	0
Simples	7	t	4-16	0,1950	0	SIM	14	14	0	0
Simples	8	t	16-4	-0,1950	0	SIM	14	14	0	0
Simples	9	t	6-13	-0,0700	0	SIM	7	7	0	0
Simples	10	t	13-6	0,0700	0	SIM	7	7	0	0
Simples	11	t	7-17	-0,0600	0	SIM	7	7	0	0
Simples	12	t	17-7	0,0600	0	SIM	7	7	0	0
Simples	13	t	8-18	-0,0550	0	SIM	7	7	0	0
Simples	14	t	18-8	0,0550	0	SIM	7	7	0	0
Simples	15	t disj	2-9	-0,2750	0	SIM	19	19	0	0
Simples	16	t disj	2-10	-0,1700	0	SIM	16	16	0	0
Simples	17	t disj	2-13	0,0700	0	SIM	7	7	0	0
Simples	18	t disj	5-18	0,0550	0	SIM	7	7	0	0
Simples	19	t disj	19-12	0,0000	0,01	SIM	1	1	0	0
Simples	20	t disj	14-16	0,0000	0,01	SIM	1	1	0	0
Simples	21	t disj	14-17	0,0000	0	SIM	1	1	0	0
Simples	22	p	1	0,2750	0	SIM	19	19	0	0
Simples	23	p	2	-0,1200	0	SIM	19	19	0	0
Simples	24	p	3	0,1700	0	SIM	16	16	0	0
Simples	25	p	4	-0,0600	0	SIM	10	10	0	0
Simples	26	p	5	-0,0800	0	SIM	14	14	0	0
Simples	27	p	6	-0,0700	0	SIM	7	7	0	0
Simples	28	p	7	-0,0600	0	SIM	7	7	0	0
Simples	29	p	8	-0,0550	0	SIM	7	7	0	0

TABELA 13 - RESULTADO TESTE DE COLINEARIDADE- ERROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS

(IEEE-19\_1)

ERRO SIMULADO						COMPORTAMENTO AVALIADO				T. Cos. Modif.
TIPO	INFORMAÇÃO			VALOR [pu]		ERRO IDENT.	Número de Suspeitos		Nº RE- ESTIMA.	Nº RE- ESTIMA.
	Nº.	TIPO	RAMO ou BARRA	REAL	SIMUL.		$\left \lambda_m^N\right  > \lambda_i$	1ª ETAPA T. Cos.		
Múltiplos	15	t disj	2-9	-0,2750	-0,33	SIM				
	16	t disj	2-10	-0,1700	-0,204	SIM	13	13	1	0
	17	t disj	2-13	0,0700	0,084	SIM	11	11		
	23	p	2	-0,1200	-0,144	SIM				
Múltiplos	1	t	1-9	0,2750	1,1	SIM				
	5	t	4-11	-0,2550	-1,02	SIM				
	15	t disj	2-9	-0,2750	-1,1	SIM				
	17	t disj	2-13	0,0700	0,28	SIM	26	26	1	1
	24	p	3	0,1700	0,68	SIM	22	22		
	27	p	6	-0,0700	-,28	SIM				
	28	p	7	-0,0600	-0,24	SIM				
	29	p	8	-0,0550	-0,22	SIM				
Múltiplos	1	t	1-9	0,2750	0	SIM				
	5	t	4-11	-0,2550	-1,02	SIM				
	15	t disj	2-9	-0,2750	-1,1	SIM	26	26		
	17	t disj	2-13	0,0700	0,28	SIM	22	22	2	1
	22	p	1	0,2750	1,1	SIM	4	4		
	23	p	2	-0,1200	-0,48	SIM	19	19		
	26	p	5	-0,0800	-0,32	SIM				
	29	p	8	-0,0550	-0,22	SIM				
UTR BARRA 1	1	t	1-9	0,2750	0	SIM				
	22	p	1	0,2750	0	SIM	19	19	0	0
UTR BARRA 2	15	t disj	2-9	-0,2750	0	SIM				
	16	t disj	2-10	-0,1700	0	SIM	16	16	0	0
	17	t disj	2-13	0,0700	0	SIM	17	17		
	23	p	2	-0,1200	0	SIM				
UTR BARRA 3	3	t	3-10	0,1700	0	SIM	19	19	0	0
	24	p	3	0,1700	0	SIM				
UTR BARRA 4	5	t	4-11	-0,2550	0	SIM				
	7	t	4-16	0,1950	0	SIM	26 8	26 8	1	0
	25	p	4	-0,0600	0	SIM				
UTR BARRA 5	18	t disj	5-18	0,0550	0	SIM	11	11	0	0
	26	p	5	-0,0800	0	SIM				
UTR BARRA 6	9	t	6-13	-0,0700	0	SIM	16	16	0	0
	27	p	6	-0,0700	0	SIM				
UTR BARRA 7	11	t	7-17	-0,0600	0	SIM	11	11	0	0
	28	p	7	-0,0600	0	SIM				
UTR BARRA 8	13	t	8-18	-0,0550	0	SIM	11	11	0	0
	29	p	8	-0,0550	0	SIM				

LEGENDA:  $t$  (medida de fluxo em linha de transmissão),  $t$  disj (medida de fluxo em disjuntor) e  $p$  (medida de injeção de potência).

Quando se simulam erros em medidas, mesmo não havendo conjuntos críticos envolvendo as medidas analógicas, várias medidas apresentam MLN com os mesmos valores absolutos, conforme já abordado na Seção 6.1.

### 6.3.1 Comportamento dos Métodos de IEM diante de Erros de Topologia

Um erro de topologia tem uma influência significativa nos valores dos MLN das medidas, e, portanto, no conjunto de informações suspeitas. Um único erro de topologia, mesmo não havendo nenhum erro nos valores das medições analógicas informadas ao estimador de estados, é responsável pela indicação de diversas medidas como suspeitas, ou seja, medidas com valores absolutos de MLN maiores que o limiar adotado.

Percebe-se pelos resultados apresentados, uma propagação dos erros bem maior na ocorrência de erros de topologia do que na ocorrência de erros em medidas. Por este motivo, propõe-se realizar a IET primeiramente e só depois de uma reestimação executar a identificação de erros grosseiros em medidas.

## 6.4 SIMULAÇÃO SIMULTÂNEA DE ERROS

O algoritmo completo proposto para identificação conjunta de erros de topologia e em medidas mostrou-se eficiente na detecção e identificação de erros de topologia, separadamente. A seguir apresentam-se os resultados dos diversos testes realizados para validar o algoritmo na ocorrência simultânea de erros de topologia e em medidas.

Ao simular-se qualquer combinação de um único erro em medida em conjunto com um único erro de topologia, o algoritmo identificou corretamente todas as informações errôneas (um disjuntor e uma medida), necessitando de apenas uma reestimação na transição da IET para a IEM. Nesta mesma situação, um comportamento interessante foi à presença de apenas uma única restrição suspeita ou

apenas restrições suspeitas pertencentes a um mesmo conjunto crítico.

Simulando-se um erro simples de topologia simultaneamente com erros múltiplos em medidas ou de falha em UTR, o algoritmo identificou corretamente todas as informações errôneas (um disjuntor e todas as medidas errôneas), entretanto, em alguns casos necessitou realizar reestimações adicionais.

Quando há presença de erros múltiplos de topologia (inclusão/exclusão ou *bus split*) em conjunto com qualquer erro em medida (simples ou múltiplos), a eficiência do método proposto é muito baixa, pois nem sempre aponta todos os erros, bem como em certos casos algumas informações livres de erro são rotuladas como errôneas.

## 6.5 RESULTADOS IMPORTANTES

As simulações equivalentes realizadas para o modelo completo (IEEE30) e sub-rede relevante (IEEE19) demonstram que:

- a) O modelo completo possui menos problemas de criticidade do que o modelo da sub-rede relevante, o que era esperado pois há um maior número de medidas no primeiro caso;
- b) O modelo completo apresenta uma maior dimensão do problema e também uma maior propagação dos erros por outras medidas do sistema.

O teste de colinearidade computado para a informação com o maior valor absoluto do MLN, confirma o pressuposto difundido de que o maior MLN corresponde à informação errônea, no caso de um único erro simples:

- a) De topologia, pois  $\cos \theta_{\lambda_{m\acute{a}x}}^N = \cos \theta_{\lambda_{o\_m\acute{a}x}}^N > 0.9$ ; e
- b) De medida, pois  $\cos \theta_{\lambda_{m\acute{a}x}}^N = \cos \theta_{\lambda_{m\_m\acute{a}x}}^N > 0.9$ .

Nos testes realizados, quando estão presentes somente erros grosseiros em medidas (simples ou múltiplos) o maior MLN corresponderá a uma medida errônea, resultado este utilizado na IEM pelo método de eliminação.

Verificou-se uma correlação significativa entre a eficiência dos métodos de

identificação de erros e a redundância das medidas, uma vez que, quanto maior o número de erros simultâneos e a correlação entre os mesmos, menos confiável é o banco de dados contendo as informações/estados do sistema e conseqüentemente pior será o desempenho dos métodos de identificação de erros.

Verificou-se uma pequena melhora na redundância do sistema quando da utilização de informações *a priori*, pois o condicionamento da matriz  $V$  é afetado, já que alguns dos valores que eram iguais a zero sem a inclusão das mesmas, apesar de ainda serem pequenos, serão um pouco maiores utilizando-se  $P_{inv}$ . Além disso, os problemas numéricos decorrentes de informações críticas são atenuados.

A análise de criticidade realizada a partir da configuração real dos disjuntores modelados em um determinado sistema pode indicar a ocorrência de restrições operacionais críticas. Entretanto, quando ocorre erro no *status* de um disjuntor cuja restrição operacional é apontada como crítica na situação anterior, a informação deste novo *status*, mesmo apresentando erro de modelagem, é então considerada correta, e uma análise de criticidade executada para esta nova configuração, demonstrou que a restrição operacional do disjuntor errôneo deixou de ser crítica.

Os tempos de simulação do método do cosseno original e do teste de colinearidade modificado mostraram-se compatíveis em todas as simulações realizadas.

O erro no *status* de um disjuntor propaga-se pelas medidas analógicas inviabilizando a utilização do teste de colinearidade para IEM, sem que se realize antes a identificação e correção das restrições operacionais errôneas.

O teste de colinearidade modificado e elaborado neste trabalho prioriza a identificação de erros simples ou de um pequeno número de erros, sem a necessidade de reestimações. Na maioria dos casos, seu tempo de execução mostrou-se compatível com o tempo dispensado pelo teste de colinearidade original [17], porém, em alguns casos, o método do teste de colinearidade modificado proposto exigiu mais tempo de cálculo.

Vislumbra-se com esta nova proposta a possibilidade de identificação

simultânea de erros, ou seja, a execução do teste de colinearidade englobando erros de topologia e erros em medidas ao mesmo tempo. Há perspectivas de que esta análise simultânea seja validada, eliminando assim a necessidade de segregação de métodos na identificação de cada tipo de erro.

## 6.6 CONCLUSÕES

A análise da natureza do erro nos fornece um conjunto rico de informações referente ao comportamento da estimação de estados generalizada e dos métodos específicos utilizados diante de erros.

A execução da IET, a correção dos *status* errôneos e a realização de uma nova estimação de estados posteriormente a IEM mostrou-se eficiente e permitiu a identificação correta de informações conforme os resultados apresentados neste capítulo.

Comprovou-se a correlação entre a redundância do plano de medição e a eficiência dos métodos de identificação de erros, principalmente na ocorrência de erros múltiplos responsáveis pela degradação da base de dados e da redundância do sistema. Apesar de alguns erros não terem sido corretamente identificados e da necessidade de reestimações adicionais em determinados casos, estes resultados não representam uma barreira ou empecilho à utilização da metodologia proposta, pois os mesmos representam condições severas a qualquer metodologia de identificação de erros.



## **7 CONCLUSÕES FINAIS**

Esta dissertação propõe um algoritmo para uso na operação em tempo real de sistemas de potência capaz de identificar erros de topologia e erros grosseiros em medidas tomando por base o conjunto de informações disponíveis do sistema em estudo, possibilitando dessa forma a correta estimação dos estados do sistema. Os objetivos principais deste trabalho foram a investigação da natureza do erro detectado e a identificação conjunta de erros.

A motivação para tais análises surge da influência dos erros de topologia e em medidas sobre os resultados das informações processadas pelo estimador de estados e da correlação existente entre ambas na propagação destes erros. A identificação do comportamento do estimador de estados e o comportamento dos métodos atualmente utilizados diante de ambos os tipos de erros ainda não havia sido satisfatoriamente abordado. Além disso, reduziu-se a distância entre os métodos de identificação de erros de topologia e de identificação de erros grosseiros em medidas utilizando-se de um mesmo método simples para identificação de erros de topologia e em medidas, o teste de colinearidade ou testes geométricos de colinearidade.

De modo a possibilitar a correta detecção e identificação de erros, supondo-se que não se conhece a fonte de erro ou se há ocorrência de erros múltiplos, tem-se a primeira contribuição deste trabalho, obtida a partir da análise do comportamento dos MLN e dos testes de colinearidade. Ambos os métodos são utilizados em conjunto, com a finalidade de fornecer um panorama prévio do processo de identificação de erros, pela determinação do tipo de erro presente na estimação de estados e da escolha do método apropriado ao tratamento de cada um destes tipos de erros. Assim, a partir desta análise, desenvolveu-se uma metodologia capaz de balizar e mapear a natureza do erro detectado, seja de topologia, medida ou de ambos os tipos.

Na identificação de erros de topologia, o pior caso é aquele em que entre os errôneos (apontados como resultado dos testes de colinearidade) figurem representantes de conjuntos críticos. Neste caso, serão necessárias novas estimações de

estados até a identificação da correta configuração dos disjuntores. Mesmo neste caso, a identificação ainda é menos dispendiosa que na proposta inicial apresentada em [8], em que são realizadas reestimações para todas as combinações de suspeitos.

Na identificação de erros grosseiros em medidas utilizaram-se os testes de colinearidade, como forma de apresentar mais resultados do método com esta finalidade. A IEM pelos testes de colinearidade não se dá por encerrada, pois necessita ser comparada sob as mesmas condições diante de outras metodologias [19].

Uma característica, algumas vezes desconsiderada quando se avaliam os métodos de identificação de erros de topologia modelados no nível de subestação, é a importância da manutenção também de medidas analógicas corretas e confiáveis. As medidas têm grande importância, pois são as informações inicialmente disponíveis no modelo barra-ramo, podendo, na presença de erros, indicar incorretamente a zona de anomalia ou afetar o resultado de outros aplicativos que utilizam estas informações.

Os resultados dos casos testados permitem uma prévia constatação do comportamento da EESP pela verificação da natureza do erro, bem como ressaltam a utilização dos testes de colinearidade na IEM, sustentando a possibilidade de identificação conjunta de erros de topologia e medida em determinados casos.

Quando da simulação da ocorrência de diversos erros simultaneamente, percebe-se que a degradação das informações resulta na diminuição da confiabilidade na redundância do plano de medição adotado no processo de EESP e, portanto, os métodos de identificação de erro tornam-se ineficientes.

Em resumo, os testes de colinearidade aplicados na IEM, a análise da natureza dos erros detectados, bem como a identificação conjunta de erros de topologia e em medidas, desde que mantida uma redundância aceitável do plano de medição na presença de erros, constituem métodos atraentes e relevantes para se alcançar uma operação segura e confiável de sistemas elétricos de potência. Os obtidos neste trabalho apontam a possibilidade da aplicação dos métodos propostos num sistema real.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho, observou-se a pertinência de algumas melhorias. Como sugestões, podem-se citar:

- a) Estender a metodologia para o modelo AC.
- b) Utilização do teste de colinearidade modificado para identificação conjunta de erros de topologia e medidas sem reestimações adicionais.
- c) Comparação da eficiência do teste de colinearidade perante outras metodologias de IEM [31], e aplicação ao modelo barra-ramo.
- d) Incluir medições fasoriais sincronizadas.
- e) Identificação de erros em parâmetros, em barras de referências e barras de injeção nula.
- f) Determinar a capacidade e mapear a estimação de estados generalizada em conjunto com os métodos de detecção e identificação de erros, diante de variações nas medidas de tensão (95% a 105%) e de diferentes valores de erros nas medidas ( $2\sigma$ ,  $5\sigma$ ,  $10\sigma$ ,  $20\sigma$ ).
- g) Incluir a verificação de erros em *taps* de transformadores, e inclusão ou não de compensadores/bancos de capacitores.
- h) Utilizar o estimador trifásico, de modo a verificar a capacidade de identificação de defeitos em equipamentos do sistema de medição (transformadores de potencial e de corrente), uma vez a perda de medição de uma fase, por exemplo, não pode ser percebida pelo estimador monofásico.
- i) Implementação dos testes de hipóteses ou técnicas de Inteligência Artificial (IA), tais como fuzzy, algoritmos genéticos, entre outros, para simular todas as combinações de erros de topologia, ou testes para ambas as condições de operação de todos os disjuntores, de modo a apontar o *status* correto dos disjuntores rotulados como desconhecidos.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Monticelli. "State Estimation in Electric Power Systems". Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] A. Monticelli. "Electric power system state estimation". *Proceedings of the IEEE*, 88(2): 262–282, Feb. 2000.
- [3] A. Monticelli. "Fluxo de carga em redes de energia elétrica". Editora Edgard Blücher, 1983.
- [4] O. Alsaç, N. Vempati, A. Monticelli. "Generalized State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(3):1069-1075, Aug. 1998.
- [5] A. Monticelli, A. Garcia. "Modeling zero impedance branches in power systems state estimation". *IEEE/PES Winter Meeting*, 8(1):364-370, Jan. 1991.
- [6] A. Monticelli. "The impact of modeling short circuits branches in state estimation". *IEEE Trans. On Power Systems*, 8(1):364-370, Feb. 1993.
- [7] A. Abur, H. Kim, and M. K. Çelik. "Identifying the Unknown Circuit Breaker Statuses in Power Networks". *IEEE Trans. on Power Systems*, 10(4):2029-2037, Nov. 1995.
- [8] K. A. Clements, A. Simões Costa. "Topology error identification using normalized Lagrange multipliers". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(2): 347–353, May 1998.
- [9] E. M. Lourenço, A. Simões Costa. "Identificação de erros de topologia via multiplicadores de lagrange normalizados e testes de hipóteses". *Congresso Brasileiro de Automática*, Set. 2000.
- [10] E. M. Lourenço, A. Simões Costa. "Identificação de erros de topologia via multiplicadores de lagrange normalizados e testes de hipóteses". *Revista Controle & Automação*, 14(2): 166–175, Jun. 2003.
- [11] F. Vieira. "Identificação de erros de topologia em sistemas de potência através de métodos ortogonais e testes de hipóteses". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.
- [12] L. Colzani. "Determinação de sub-redes relevantes para identificação de erros topológicos em sistemas de potência". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.
- [13] E. M. Lourenço. "Análise de observabilidade e identificação de erros de topologia na estimação de estados generalizada". Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.
- [14] E. M. Lourenço, K. A. Clements, A. Simões Costa. "Geometrically-based hypothesis testing for topology error identification". *14th Power Systems Computation Conference, Seville, Spain*, session 37, paper 4, Jun. 2002.
- [15] E. M. Lourenço, K. A. Clements, A. Simões Costa. "A hybrid probabilistic/topological approach to topology error identification in power system real time modeling". *7<sup>th</sup> PMAPS Conference, Naples, Italy*, pages 105-110, Sep. 2002.

- [16] E. M. Lourenço, K. A. Clements, A. Simões Costa, R. A. Cernev. "Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 19(2): 1206–1215, May 2004.
- [17] E. M. Lourenço, K. A. Clements, A. Simões Costa, R. A. Cernev. "A topology error identification method directly based on collinearity tests". *IEEE Trans. on Power Systems*, 21(4): 1920–1929, Nov. 2006.
- [18] L. Mili, T. Van Cutsem, M. Ribblens-Pavella. "Hypothesis testing identification: a new method for bad data analysis in power system state estimation". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 104(11): 3239–3252, Nov. 1984.
- [19] L. Mili, T. Van Cutsem, M. Ribblens-Pavella. "Bad data identification in power system state estimation – A comparative study". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(11): 3037–3049, Nov. 1985.
- [20] L. Mili, T. Van Cutsem. "Implementation of the hypothesis testing identification in power system state estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(3): 887–893, Aug. 1988.
- [21] L. Mili, M. G. Cheniae, P. J. Rousseeuw. "Identification of multiple interacting bad data via power system decomposition". *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(3): 887–893, Aug. 1988.
- [22] G. N. Korres, P. J. Katsikas. "Identification of circuit breaker statuses in WLS state estimator". *IEEE Trans. on Power Systems*, 17(3): 818–825, Aug. 2002.
- [23] A. Simões Costa, J. A. Leão. "Identification of topology errors in power system state estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 8(4): 1531–1538, Nov. 1993.
- [24] A. P. A. Silva, V. H. Quintana, G. K. H. Pang. "A pattern analysis approach for measurement determination, bad data correction and missing measurement estimation in power systems". *Proceedings of the IEEE*: 363–372, 1990.
- [25] S. Zhong. "Combined state estimation and measurement calibration". *IEEE Trans. on Power Systems*, 20(1): 458–465, Feb. 2005.
- [26] J. C. Pereira, J. T. Saraiva, V. Miranda, A. S. Costa, E. M. Lourenço, K. A. Clements. "Comparison approaches to identify topology errors in the scope of state estimation studies". *IEEE Porto Power Tech Conference*, Sep. 2001.
- [27] N. Vempati, C. Silva, O. Alsaç, B. Stott. "Topology Estimation". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1: 806–810, Jun. 2005.
- [28] E. N. Asada. "Análise de observabilidade e processamento de erros grosseiros conformativos utilizando metaheurística Busca Tabu na estimação de estado generalizada". Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.
- [29] A. Gómez-Expósito, A. V. Jáen. "Implicitly constrained substation model for state estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 17(3): 850–856, Aug. 2002.
- [30] K. A. Clements, P. W. Davis. "Multiple bad data detectability and identifiability: a geometric approach". *IEEE Trans. on Power Delivery*, PWRP-1(3): 355–360, Jul. 1986.

- [31] A. Simões Costa, E. M. Lourenço, K. A. Clements. "Power system topological observability analysis including switching branches". *IEEE/PES Trans. on Power Systems*, accepted for publication.
- [32] A. M. A. Arbeláez. "Identificação de transações não-reveladas em ambiente desregulamentado". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2000.
- [33] A. Simões Costa, R. S. Salgado, L. J. B. Machado. "*Análise de Segurança de Sistemas de Potência - Apostila*", Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFSC, 1999.
- [34] R. Ribeiro Pinto Jr. "Fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestação". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005.
- [35] E. M. Lourenço, A. Simões Costa, R. Ribeiro Pinto Jr. "Power flow at substation level using newton-raphson's method". *X Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, SP-068, May 2006.
- [36] E. M. Lourenço, A. Simões Costa, L. Colzani. "Reduced anomaly zone determination for topology error processing in generalized state estimation". *IEEE Lausanne Power Tech Conference*, Jul. 2007.
- [37] Operador Nacional do Sistema Elétrico (NOS). *Procedimentos de Rede*. Submódulo 10.19 de junho de 2001. Requisitos de telessupervisão para a operação.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A. DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS ANALÓGICAS DE CADA SISTEMA TESTE

TABELA 14 - MEDIDAS ANALÓGICAS (SISTEMA 19 BARRAS - SUB-REDE RELEVANTE DO IEEE 30 BARRAS)

SISTEMA IEEE19_1				SISTEMA IEEE19_2			
Nº.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]	Nº.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]
1	t	1-9	0,2750	1	t	1-9	0,1600
2	t	9-1	-0,2750	2	t	9-1	-0,1600
3	t	3-10	0,1700	3	t	3-10	0,1700
4	t	10-3	-0,1700	4	t	10-3	-0,1700
5	t	4-11	-0,2550	5	t	4-11	-0,0612
6	t	11-4	0,2550	6	t	11-4	0,0612
7	t	4-16	0,1950	7	t	6-13	-0,0700
8	t	16-4	-0,1950	8	t	13-6	0,0700
9	t	6-13	-0,0700	9	t	4-16	0,0012
10	t	13-6	0,0700	10	t	16-4	-0,0012
11	t	7-17	-0,0600	11	t	7-17	-0,0600
12	t	17-7	0,0600	12	t	17-7	0,0600
13	t	8-18	-0,0550	13	t	8-18	-0,0550
14	t	18-8	0,0550	14	t	18-8	0,0550
15	t disj	2-9	-0,2750	15	t	12-15	0,0788
16	t disj	2-10	-0,1700	16	t	15-12	-0,0788
17	t disj	2-13	0,0700	17	t disj	2-9	-0,1600
18	t disj	5-18	0,0550	18	t disj	2-10	-0,1700
19	t disj	19-12	0,0000	19	t disj	2-13	0,0700
20	t disj	14-16	0,0000	20	t disj	5-15	-0,0788
21	t disj	14-17	0,0000	21	t disj	5-16	-0,0012
22	p	1	0,2750	22	t disj	5-17	0,0000
23	p	2	-0,1200	23	t disj	5-18	0,0000
24	p	3	0,1700	24	t disj	19-12	0,0000
25	p	4	-0,0600	25	t disj	14-15	0,0000
26	p	5	-0,0800	26	t disj	14-16	0,0000
27	p	6	-0,0700	27	t disj	14-17	0,0600
28	p	7	-0,0600	28	t disj	14-18	0,0550
29	p	8	-0,0550	29	p	1	0,1600
				30	p	2	-0,1200
				31	p	3	0,1700
				32	p	4	-0,0600
				33	p	5	-0,0800
				34	p	6	-0,0700
				35	p	7	-0,0600
				36	p	8	-0,0550

TABELA 15 - MEDIDAS ANALÓGICAS (SISTEMA IEEE30\_1)

SISTEMA IEEE30_1											
Nº.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]	No.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]	No.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]
1	t	1-2	1,6132	40	t	21-10	-0,1686	79	t	29-30	0,037
2	t	2-1	-1,6132	41	t	10-22	0,0832	80	t	30-29	-0,037
3	t	1-3	0,8208	42	t	22-10	-0,0832	81	t disj	12-32	-0,376
4	t	3-1	-0,8208	43	t	13-33	0,0000	82	t disj	12-33	0,000
5	t	2-4	0,4204	44	t	33-13	0,0000	83	t disj	12-36	0,099
6	t	4-2	-0,4204	45	t	14-39	0,1032	84	t disj	15-41	0,004
7	t	2-5	0,7820	46	t	39-14	-0,1032	85	t disj	31-35	0,000
8	t	5-2	-0,7820	47	t	14-34	-0,1652	86	t disj	39-37	0,000
9	t	2-6	0,5938	48	t	34-14	0,1652	87	t disj	40-37	0,000
10	t	6-2	-0,5938	49	t	16-17	0,0641	88	p	1	2,434
11	t	3-4	0,7968	50	t	17-16	-0,0641	89	p	2	0,183
12	t	4-3	-0,7968	51	t	16-36	-0,0991	90	p	3	-0,024
13	t	4-6	0,7648	52	t	36-16	0,0991	91	p	4	-0,076
14	t	6-4	-0,7648	53	t	18-19	-0,0146	92	p	5	-0,942
15	t	4-32	0,3764	54	t	19-18	0,0146	93	p	6	0,000
16	t	32-4	-0,3764	55	t	18-40	-0,0174	94	p	7	-0,228
17	t	5-7	-0,1600	56	t	40-18	0,0174	95	p	8	-0,300
18	t	7-5	0,1600	57	t	19-20	-0,1096	96	p	9	0,000
19	t	6-7	0,3880	58	t	20-19	0,1096	97	p	10	-0,058
20	t	7-6	-0,3880	59	t	21-22	-0,0064	98	p	11	0,000
21	t	6-8	0,2986	60	t	22-21	0,0064	99	p	12	-0,112
22	t	8-6	-0,2986	61	t	22-24	0,0768	100	p	13	0,000
23	t	6-9	0,2973	62	t	24-22	-0,0768	101	p	14	-0,062
24	t	9-6	-0,2973	63	t	23-24	-0,0282	102	p	15	-0,082
25	t	6-10	0,1700	64	t	24-23	0,0282	103	p	16	-0,035
26	t	10-6	-0,1700	65	t	23-41	-0,0038	104	p	17	-0,090
27	t	6-28	0,2048	66	t	41-23	0,0038	105	p	18	-0,032
28	t	28-6	-0,2048	67	t	24-25	-0,0384	106	p	19	-0,095
29	t	8-28	-0,0014	68	t	25-24	0,0384	107	p	20	-0,022
30	t	28-8	0,0014	69	t	25-26	0,0350	108	p	21	-0,175
31	t	9-10	0,2973	70	t	26-25	-0,0350	109	p	22	0,000
32	t	10-9	-0,2973	71	t	25-27	-0,0734	110	p	23	-0,032
33	t	9-11	0,0000	72	t	27-25	0,0734	111	p	24	-0,087
34	t	11-9	0,0000	73	t	27-28	-0,2034	112	p	25	0,000
35	t	10-17	0,0259	74	t	28-27	0,2034	113	p	26	-0,035
36	t	17-10	-0,0259	75	t	27-29	0,0606	114	p	27	0,000
37	t	10-20	0,1316	76	t	29-27	-0,0606	115	p	28	0,000
38	t	20-10	-0,1316	77	t	27-30	0,0694	116	p	29	-0,024
39	t	10-21	0,1686	78	t	30-27	-0,0694	117	p	30	-0,106



TABELA 16 - MEDIDAS ANALÓGICAS (SISTEMA IEEE30\_2)

SISTEMA IEEE30_2											
Nº.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]	No.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]	No.	TIPO	RAMO ou BARRA	VALOR REAL [pu]
1	t	1-2	1,2061	43	fluxo	13-33	0,0000	85	t disj	12-36	-0,0122
2	t	2-1	-1,2061	44	fluxo	33-13	0,0000	86	t disj	15-38	-0,0908
3	t	1-3	0,5898	45	fluxo	14-39	-0,0088	87	t disj	15-39	0,0088
4	t	3-1	-0,5898	46	fluxo	39-14	0,0088	88	t disj	15-40	0,0000
5	t	2-4	0,2851	47	fluxo	14-34	-0,0532	89	t disj	15-41	0,0000
6	t	4-2	-0,2851	48	fluxo	34-14	0,0532	90	t disj	31-35	0,0000
7	t	1-5	0,6983	49	fluxo	16-17	-0,0472	91	t disj	38-37	0,0000
8	t	5-2	-0,6983	50	fluxo	17-16	0,0472	92	t disj	39-37	0,0000
9	t	2-6	0,4057	51	fluxo	16-36	0,0122	93	t disj	40-37	-0,3235
10	t	6-2	-0,4057	52	fluxo	36-16	-0,0122	94	t disj	41-37	-0,3146
11	t	3-4	0,5658	53	fluxo	18-19	0,2915	95	p	1	1,7958
12	t	4-3	-0,5658	54	fluxo	19-18	-0,2915	96	p	2	0,1830
13	t	4-6	0,5311	55	fluxo	18-40	-0,3235	97	p	3	-0,0240
14	t	6-4	-0,5311	56	fluxo	40-18	0,3235	98	p	4	-0,0760
15	t	4-32	0,2438	57	fluxo	19-20	0,1965	99	p	5	-0,9420
16	t	32-4	-0,2438	58	fluxo	20-19	-0,1965	100	p	6	0,0000
17	t	5-7	-0,2437	59	fluxo	21-22	-0,1192	101	p	7	-0,2280
18	t	7-5	0,2437	60	fluxo	22-21	0,1192	102	p	8	-0,3000
19	t	6-7	0,4717	61	fluxo	22-24	-0,1100	103	p	9	0,0000
20	t	7-6	-0,4717	62	fluxo	24-22	0,1100	104	p	10	-0,0580
21	t	6-8	0,2740	63	fluxo	23-24	0,2826	105	p	11	0,0000
22	t	8-6	-0,2740	64	fluxo	24-23	-0,2826	106	p	12	-0,1120
23	t	6-9	0,0545	65	fluxo	23-41	-0,3146	107	p	13	0,0000
24	t	9-6	-0,0545	66	fluxo	41-23	0,3146	108	p	14	-0,0620
25	t	6-10	0,0312	67	fluxo	24-25	0,0856	109	p	15	-0,0820
26	t	10-6	-0,0312	68	fluxo	25-24	-0,0856	110	p	16	-0,0350
27	t	6-28	0,1054	69	fluxo	25-26	0,0350	111	p	17	-0,0900
28	t	28-6	-0,1054	70	fluxo	26-25	-0,0350	112	p	18	-0,0320
29	t	8-28	-0,0260	71	fluxo	25-27	0,0506	113	p	19	-0,0950
30	t	28-8	0,0260	72	fluxo	27-25	-0,0506	114	p	20	-0,0220
31	t	9-10	0,0545	73	fluxo	27-28	-0,0794	115	p	21	-0,1750
32	t	10-9	-0,0545	74	fluxo	28-27	0,0794	116	p	22	0,0000
33	t	9-11	0,0000	75	fluxo	27-29	0,0606	117	p	23	-0,0320
34	t	11-9	0,0000	76	fluxo	29-27	-0,0606	118	p	24	-0,0870
35	t	10-17	0,1372	77	fluxo	27-30	0,0694	119	p	25	0,0000
36	t	17-10	-0,1372	78	fluxo	30-27	-0,0694	120	p	26	-0,0350
37	t	10-20	-0,1745	79	fluxo	29-30	0,0366	121	p	27	0,0000
38	t	20-10	0,1745	80	fluxo	30-29	-0,0366	122	p	28	0,0000
39	t	10-21	0,0558	81	fluxo	38-35	-0,0908	123	p	29	-0,0240
40	t	21-10	-0,0558	82	fluxo	35-38	0,0908	124	p	30	-0,1060
41	t	10-22	0,0091	83	t disj	12-32	-0,2438				
42	t	22-10	-0,0091	84	t disj	12-33	0,0000				